Матеріали

XXV Міжнародної науково-практичної конференції

"Екологія. Людина. Суспільство"

пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА

(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings

of the 25th International Scientific and Practical Conference

"Ecology. Human. Society"

dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN

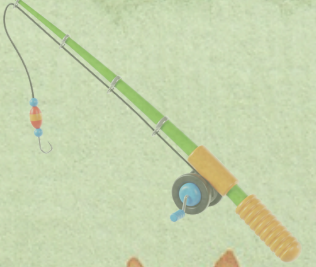
(June 12, 2025, Kyiv, Ukraine)

SINCE 1993

Dr. Emil Benatov & Partners

PATENT AND TM BUREAU

Дмитро Володимирович
СТЕФАНИШИН
(1960 - 2025)



КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
ІНСТИТУТ
ім. Ігоря Сікорського

Igor Sikorsky
KYIV
POLYTECHNIC
INSTITUTE

МАТЕРІАЛИ

XXV Міжнародної науково-практичної конференції
ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. СУСПІЛЬСТВО
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

PROCEEDINGS

of the XXV International Science Conference
ECOLOGY. HUMAN. SOCIETY
dedicated to the memory
of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12, 2025, Kyiv, Ukraine)

2025

УДК 574 (063)

Рецензенти:	Тетяна ШАБЛІЙ, д-р тех. наук, проф. Валерія ВЕМБЕР, канд. біол. наук, доц. Юлія ЛУЧАКІВСЬКА, к.б.н. Юлія НОСАЧОВА, канд. тех. наук., доц. Ярослав РАДОВЕНЧИК, канд. тех. наук., доц.
Укладач та відповідальний за випуск:	Данило БЕНАТОВ, канд. тех. наук., доц.
Дизайн і верстка:	Ілона БЕНАТОВА, Данило БЕНАТОВ
Обкладинка	Яна ГЕРУК

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам’яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна) / Укладач Д. Е. Бенатов. — К.: Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, 2025. — 420 с.

Збірка містить статті, присвячені питанням розробки та впровадження безвідходних технологій, очистки природних і стічних вод від забруднень антропогенного характеру, знешкодження газових викидів, рекуперації промислових відходів, розробки, проектування та впровадження екологічно чистих технологій та обладнання, екологічного моніторингу, екології популяції, охорони рослинного та тваринного світу, впливу стану навколишнього середовища на здоров’я населення, застосування методів математичного моделювання та прогнозування у промисловій екології, а також управлінським, соціально-економічним і правовим аспектам раціонального природокористування та екологічної безпеки. Для студентів, аспірантів, науковців і всіх, хто цікавиться проблемами захисту навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів.

- *Подані матеріали пройшли рецензування і публікуються у кінцевій авторській редакції.*
- *Організаційні внески учасників конференції були передані на благодійні потреби.*
- *Збірку підготовлено та видано за підтримки* ***Патентного бюро "Д-р Еміл Бенатов та Партнери"****.*

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12, 2025, Kyiv, Ukraine) / Compiled by D. Benatov. — K.: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025. — 420 p.

This edition includes articles devoted to development and introduction of wasteless technologies, natural waters and sewage purifying from anthropogenic pollution, gas emission neutralization, industrial waste recuperation, development, design and introduction of non-polluting technologies and equipment, ecological monitoring problems, population ecology, flora and fauna protection, environmental influence on people health, methods of mathematical modelling and forecasting application in industrial ecology, administrative, social, economic and law aspects of natural resources rational use and ecological safety. For students, post-graduates, scientists and everyone who is interested in environment protection and natural recourses rational use problems.

- *The submitted materials were reviewed and published in the final author's version.*
- *All administrative fees were donated to charity.*
- *This handbook was prepared and published with the support of the* ***Patent Bureau "Dr. Emil Benatov and Partners"****.*

Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
03056, м. Київ, пр-т Берестейський, 37, тел. (044) 454–9243
Наклад 150 пр.

ISSN (Online) 2710-3315
© Усі права авторів захищені, 2025

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Юріс БУРЛАКОВС	PhD, проф. Латвійського технічного університету **(Латвія)**
Віра ГОВОРУХА	канд. біол. наук, ст. н. с., Інститут мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України **(Україна)**
Микола ГОМЕЛЯ	д-р тех. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського **(Україна)**
Гінтарас ДЕНАФАС	д-р наук, проф., Каунаський технологічний університет **(Литва)**
Тетяна ДОНЦОВА,	д-р тех. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського **(Україна)**
Ірина ДРОНОВА	д-р філософії, проф. Університету Каліфорнії в м. Берклі **(США)**
Івар ЗЕККЕР	PhD, Тартуський університет **(Естонія)**
Олена ІВАНЕНКО	д-р тех. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського **(Україна)** ***голова програмного комітету***
Милиця КАРЕВА	викладач Палацу дітей та юнацтва м. Києва **(Україна)**
Іван КОЗЯТНИК	канд. хім. наук., асоц. проф., Лінчепінгський університет **(Швеція)**
Василь КОРБУТЯК	канд. тех. наук., доц., Національний університет водного господарства та природокористування **(Україна)**
Олександр КОРНІЄНКО	перший заступник голови Верховної Ради України, голова Наглядової ради КПІ ім. Ігоря Сікорського **(Україна)**
Юлія ЛУЧАКІВСЬКА	канд. біол. наук., зав. лабораторії експериментальної біології Палацу дітей та юнацтва м. Києва **(Україна)**
Валерій МИХАЙЛЕНКО	канд. хім. наук, доц. КНУ ім. Т. Г. Шевченка **(Україна)**
Ігор СВІКІС	викладач, Латвійський університет **(Латвія)**
Андрій СТЕПАНЮК	канд. тех. наук, доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського **(Україна)**
Дмитро СТЕФАНИШИН	д-р тех. наук, проф., Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України **(Україна)**
Олександр ТАШИРЄВ	д-р тех. наук, проф., Університет м. Ополе **(Польща)**

CONFERENCE PROGRAM COMMITTEE

Juris BURLAKOVS	PhD, prof., Riga Technical University **(Latvia)**
Vira HOVORUKHA	PhD, senior researcher, D. K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine **(Ukraine)**
Mykola GOMELYA	ScD, prof.,Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute **(Ukraine)**
Gintaras DENAFAS	ScD, prof., Kaunas University of Technology **(Lithuania)**
Tetiana DONTSOVA,	ScD, prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute **(Ukraine)**
Iryna DRONOVA	PhD, prof., University of California, Berkeley **(USA)**
Ivar ZEKKER	PhD, University of Tartu **(Estonia)**
Olena IVANENKO	ScD, prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute **(Ukraine)** ***chief of the Program Committee***
Mylytsia KAREVA	Lecturer, Kyiv Palace of Children and Youth **(Ukraine)**
Ivan KOZYATNYK	PhD, assoc. professor, Linköping University **(Sweden)**
Vasyl KORBUTIAK	PhD, assoc. prof., National University of Water and Environmental Engineering **(Ukraine)**
Oleksandr KORNIYENKO	First Deputy Chairman of the Verkhovna Rada (parliament) of Ukraine, Chairman of the Supervisory Board of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute **(Ukraine)**
Yuliya LUCHAKIVSKA	PhD, Head of the Laboratory of Experimental Biology, Kyiv Palace of Children and Youth **(Ukraine)**
Valerii MYKHAILENKO	PhD, assoc. prof., Taras Shevchenko National University of Kyiv **(Ukraine)**
Igor SVIKIS	Lecturer, University of Latvia **(Latvia)**
Andrii STEPANYUK	PhD, assoc. prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute **(Ukraine)**
Dmytro STEFANYSHYN	ScD, prof., Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine **(Ukraine)**
Oleksandr TASHYREV	ScD, senior scientific researcher, D. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, National Academy of Science of Ukraine (Ukraine)

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Данило БЕНАТОВ	канд. тех. наук, доц. КПІ ім. Ігоря Сікорського, ***голова організаційного комітету конференції***
Валерія ВЕМБЕР	канд. біол. наук, доц. КПІ ім. Ігоря Сікорського
Юлія НОСАЧОВА	канд. тех. наук, доц. КПІ ім. Ігоря Сікорського
Ярослав РАДОВЕНЧИК	канд. тех. наук, доц. КПІ ім. Ігоря Сікорського
Дмитро СІДОРОВ	канд. тех. наук, доц. КПІ ім. Ігоря Сікорського
Тетяна ШАБЛІЙ	д-р тех. наук, проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського

CONFERENCE ORGANIZING COMMITTEE

Daniel BENATOV	PhD, assoc. prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, ***head of the Organizing Committee***
Valeriia VEMBER	PhD, assoc. prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Yuliia NOSACHOVA	PhD, assoc. prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Yaroslav RADOVENCHYK	PhD, assoc. prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Dmytro SIDOROV	PhD, assoc. prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Tetiana SHABLIY	ScD, prof., Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ПАМ'ЯТІ
Дмитра Володимировича СТЕФАНИШИНА

Олександр ТРОХИМЧУК
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Данило БЕНАТОВ
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського

Василь КОРБУТЯК
Національний університет водного господарства та природокористування

Дмитро Володимирович Стефанишин народився 9 серпня 1960 року у місті Брянка Луганської області. У 1982 році він з відзнакою закінчив Український інститут інженерів водного господарства (м. Рівне) за спеціальністю «Гідротехнічне будівництво річкових споруд і ГЕС», здобувши кваліфікацію інженера-гідротехніка. Після закінчення інституту розпочав роботу за професією: з 1982 по 1986 рік працював у будівельному управлінні «Чиркейгесбуд» (селище Дубки, Дагестан, Росія) на будівництві Міатлінської гідроелектростанції. З 1992 по 2008 рр. працював провідним науковим співробітником у Всеросійському науково-дослідному інституті гідротехніки ім. Б. Є. Вєдєнєєва (ВНДІГ).

У 1988 році у ВНДІГ (м. Ленінград) захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю «гідротехнічне будівництво». Тема кандидатської дисертації була пов'язана з вивченням ущільнення ґрунтів при гідромеліоративному будівництві. Після захисту дисертації тривалий час працював науковим співробітником Нарвсько-Івангородського полігону великомасштабних модельних досліджень (Ленінградська обл).

У 1998 році також у ВНДІГ (м. Санкт-Петербург) успішно захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня «доктор технічних наук» на тему "Оцінка надійності та безпеки гідротехнічних об'єктів в рамках теорії ризику і системного аналізу", що стала піонерською роботою в цій галузі.

З 2003 року працював у Національному університеті водного господарства та природокористування (НУВГП) в м. Рівне на посаді професора кафедри гідротехнічного будівництва. Для інженерів-гідротехніків викладав дисципліни, пов'язані з гідротехнічними спорудами, безпекою та ризикологією.

З 2009 р. обіймав посаду провідного наукового співробітника відділу природних ресурсів Інституту

IN MEMORY OF
Dmytro Volodymyrovych STEFANYSHYN

Oleksandr TROKHYMCHUK
Institute of Telecommunications and Global Information Space of National Academy of Sciences of Ukraine

Danylo BENATOV
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Vasyl KORBUTIAK
National University of Water and Environmental Engineering

Dmytro Volodymyrovych Stefanyshyn was born on August 9th, 1960 in the town of Brianka, Luhansk region. In 1982, he graduated with honours from the Ukrainian Institute of Water Management Engineers (Rivne) with a degree in "Hydraulic Engineering of River Structures and Hydroelectric Power Plants," obtaining the qualification of hydraulic engineer. After graduating, he started professional career: from 1982 to 1986 he worked at the construction department of "Chirkeigesbud" (Dubky settlement, Dagestan, Russia) on the construction of the Miatlinskaya Hydroelectric Power Plant. From 1992 to 2008 he was a leading researcher at the B. E. Vedeneev All-Russia Research Institute of Hydraulic Engineering (VNIIG).

In 1988, at VNIIG (Leningrad), he defended his PhD thesis (Candidate of Technical Sciences) in the speciality "hydraulic engineering construction". The topic of his PhD dissertation was dedicated to the study of soil compaction in hydromelioration construction. After defending his thesis, he worked for a long time as a researcher at the Narva–Ivangorod large-scale model test site (Leningrad region).

In 1998, again at VNIIG (St. Petersburg), he successfully defended his dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences on the topic "Assessment of the Reliability and Safety of Hydraulic Engineering Structures within the Framework of Risk Theory and Systems Analysis," which became a pioneering work in this field.

Since 2003 he worked at the National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE) in Rivne as a professor at the Department of Hydraulic Engineering Construction. He led classes related to hydraulic structures, safety and risk science for hydraulic engineers.

Since 2009 he's been working as leading researcher at the Department of Natural Resources of the Institute of

телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (м. Київ).

За його участі в інституті було здійснено:

- розробку нової технології інтелектуального аналізу даних моніторингу, яка ґрунтується на принципах ситуаційного моделювання, в межах якої повний опис еволюції динамічної системи, що відображається рядами динаміки контрольних параметрів, замінюється скінченною множиною деяких узагальнених модельних ситуацій, які відтворюють можливі стани системи в різні періоди часу (2013-2024 рр.);
- створення нового методу розв'язання складної інтелектуальної задачі прогнозування місцевих розмивів русел і берегів рік на основі імітаційного комп'ютерного моделювання з використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу, результатів морфологічних, гідрологічних і гідравлічних досліджень і чисельного математичного моделювання кінематики місцевих розвинутих турбулентних течій за русловими утвореннями (2014-2017 рр.).
- розробку нового методу прогнозування за даними гідрологічних спостережень розрахункових значень максимальних витрат води паводків малої ймовірності перевищення в межах непараметричного підходу та гіпотези про стаціонарність максимального річкового стоку. Метод ґрунтується на екстраполяції розбіжності між оцінками статистичних ймовірностей перевищення, отриманих за допомогою різних формул емпіричної ймовірності, спостережених екстремальних витрат води (2020-2023 рр.).

Доктор Стефанишин спеціалізувався на сфері надійності інженерних споруд, гідротехнічної та гідроенергетичної безпеки. Основні напрями його наукової діяльності охоплювали імовірнісні розрахунки, аналіз, прогнозування та оцінку надійності й безпеки гідротехнічних споруд та енергетичних об'єктів, питання безпеки природокористування, оцінку ризиків і методологічні підходи у прийнятті рішень з урахуванням природно-техногенних ризиків у галузі будівництва та експлуатації гідротехнічних споруд. Він був одним із перших в Україні, хто застосував теорію ризику та системний аналіз для розв'язання проблем безпеки гребель, дамб та інших гідротехнічних конструкцій та споруд.

За свою наукову кар'єру Дмитро Володимирович опублікував понад 490 наукових і навчально-методичних праць. З-поміж них кілька монографій та довідкових видань, які набули особливої значущості для фахівців галузі та стали важливими джерелами знань і практичних рішень. Його наукові здобутки широко цитуються – за даними Google Scholar, h-індекс Д. Стефанишина дорівнює 13 за понад 990 цитувань (станом на 2025 рік).

До програмних робіт ученого належать такі:

Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine (Kyiv).

While at the Institute, he was involved in the following activities:

- design of a new technology for intelligent analysis of monitoring data based on the principles of situational modelling, wherein full description of the dynamic system evolution — represented by time series of control parameters — is replaced by a finite set of certain generalized model situations reproducing possible states of the system in different periods of time (2013–2024);
- creation of a new method for solving a complex problem of forecasting local scours of riverbeds and banks based on simulation computer modelling using Earth remote sensing data and geoinformation analysis, the results of morphological, hydrological and hydraulic studies, and numerical mathematical modelling of the kinematics of locally developed turbulent flows behind channel formations (2014–2017);
- development of a new method for forecasting, from hydrological observation data, the design values of peak discharges of floods with low exceedance probability within a non-parametric approach and the hypothesis of stationarity of maximum river runoff. The method is based on extrapolating the discrepancy between estimates of statistical exceedance probabilities of observed extreme water discharges obtained by means of various empirical probability formulas (2020–2023).

Dr. Stefanyshyn specialized in the field of reliability of engineering structures, and in hydraulic and hydropower safety. The main directions of his scientific activity included probabilistic calculations, analysis, forecasting and assessment of the reliability and safety of hydraulic structures and energy facilities, issues of environmental safety in natural resource use, risk assessment and methodological approaches to decision-making taking into account natural and man-made risks in the field of construction and operation of hydraulic structures. He was one of the first in Ukraine to apply risk theory and systems analysis to address the safety problems of dams and other hydraulic structures and facilities.

Over his scientific career, Dmytro Volodymyrovych published more than 490 scientific, educational and methodological works. Among them are several monographs and reference publications that have become particularly significant for specialists in the field and important sources of knowledge and practical solutions. His scientific achievements are widely cited — according to Google Scholar, Stefanyshyn's h-index is 13 with more than 990 citations (as of 2025).

His key works include:

- *Векслер А. Б.; Ивашинцов Д. А.; Стефанишин Д. В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. — Санкт-Петербург : ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. — 591 с. — ISBN 5-85529-089-1.*
- *Беллендир Е. Н.; Ивашинцов Д. А.; Стефанишин Д. В.; Финагенов О. М.; Шульман С. Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений : в 2 т. — Санкт-Петербург : ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003–2004. Т. 1. — 2003. — 553 с. Т. 2. — 2004. — 524 с.*
- *СО 34.21.307-2005. Безопасность гидротехнических сооружений. Основные понятия. Термины и определения : стандарт. — Санкт-Петербург : ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2005. — 35 с.*
- *Бобровський А. Л.; Стефанишин Д. В. Термінологічний словник з надійності та безпеки гідротехнічих об'єктів: словник, довідкові матеріали. Рівне: Перспектива, 2005.*
- *Сольский С. В.; Стефанишин Д. В.; Финагенов О. М.; Шульман С. Г. Надежность накопителей промышленных и бытовых отходов : монография. — Санкт-Петербург : Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2006. — 300 с. — ISBN 5-85529-118-9.*
- *Стефанишин Д. В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності : монографія. — Київ : Азимут-Україна, 2009. — 104 с.*
- *ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення : офіц. вид. Київ: Мінрегіонбуд України; ДП «Укрархбудінформ», 2010. 41 с.*

Учні та колеги згадують доктора Стефанишина як блискучого мислителя з неабиякою працездатністю. Йому був притаманний глибокий аналітичний підхід до поставлених задач, гострий розум та надзвичайно висока ерудованість. Дмитро Володимирович чималу увагу приділяв підготовці молодих науковців, будучи науковим керівником магістерських робіт і кандидатських дисертацій. Він був дуже вимогливим до своїх учнів і водночас ніколи не залишав їх сам на сам зі складними дослідницькими задачами.

Дмитро Стефанишин був одружений із Світланою Миколаївною Стефанишиною та виховав доньку Юлію. Родина пам'ятає його як людину із широкими життєвими інтересами.

Дмитро Володимирович залишив по собі багату наукову спадщину та сформовану наукову школу. Світла пам'ять про доктора Стефанишина збережеться в серцях його колег, учнів і друзів – усіх тих, кому він допоміг своєю науковою та життєвою мудрістю і наставництвом.

- *Veksler A. B., Ivashintsov D. A., Stefanyshyn D. V. Reliability, Social and Environmental Safety of Hydraulic Engineering Structures: Risk Assessment and Decision-Making. St. Petersburg: VNIIG named after B. E. Vedeneev, 2002. 591 p. ISBN 5-85529-089-1.*
- *Bellendir E. N., Ivashintsov D. A., Stefanyshyn D. V., Finagenov O. M., Shulman S. G. Probabilistic Methods for Assessing the Reliability of Earth Hydraulic Structures, in 2 vols. St. Petersburg: VNIIG named after B. E. Vedeneev, 2003–2004. Vol. 1 – 2003. 553 p. Vol. 2 – 2004. 524 p.*
- *SO 34.21.307-2005. Safety of Hydraulic Structures. Basic Concepts. Terms and Definitions: standard. St. Petersburg: VNIIG named after B. E. Vedeneev, 2005. 35 p.*
- *Bobrovskyi A. L., Stefanyshyn D. V. Terminological Dictionary on the Reliability and Safety of Hydraulic Engineering Structures: Dictionary and Reference Materials. Rivne: Perspektyva, 2005.*
- *Solskyi S. V., Stefanyshyn D. V., Finagenov O. M., Shulman S. G. Reliability of Industrial and Domestic Waste Storage Facilities: monograph. St. Petersburg: VNIIG named after B. E. Vedeneev, 2006. 300 p. ISBN 5-85529-118-9.*
- *Stefanyshyn D. V. Selected Problems of Risk Assessment and Decision-Making under Stochastic Uncertainty: monograph. Kyiv: Azymut-Ukraina, 2009. 104 p.*
- *DBN V.2.4-3:2010. Hydraulic, Energy and Reclamation Systems and Structures, Underground Mine Workings. Hydraulic Structures. General Provisions: official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine; SE "Ukrarkhbudinform", 2010. 41 p.*

His students and colleagues remember Dr. Stefanyshyn as a brilliant thinker with exceptional diligence. He was characterized by a deep analytical approach to the tasks he undertook, a sharp mind and extraordinarily broad erudition. Dmytro Volodymyrovych devoted considerable attention to the training of young researchers, acting as scientific supervisor for Master's and PhD theses. He was very demanding of his students, while at the same time never leaving them alone with complex research problems.

Dmytro Stefanyshyn was married to Svitlana Mykolaivna Stefanyshyna and they raised a daughter, Yuliia. His family remembers him as a person with wide-ranging interests in life.

Dmytro Volodymyrovych left behind a rich scientific legacy and a well-established scientific school. The bright memory of Dr. Stefanyshyn will live on in the hearts of his colleagues, students and friends – all those whom he helped with his scientific and life wisdom and mentorship.

Юлія СТЕФАНИШИНА-ГАВРИЛЮК

СПОГАДИ ПРО БАТЬКА

Дмитро Володимирович жив наукою і для науки, все інше життя тата йшло десь у паралельній реальності, яка містила лише три складові: сім'я, ліс і риболовля.

Спогади маленької шестирічної дівчинки: її 28-річний тато друкує «папери» на друкарській машинці, а я сиджу під столом і граюся з аркушами, що насправді були нотатками до майбутньої кандидатської дисертації.

Взагалі розуміння того, що в мого тата «дивна робота» і «дивна професія» прийшло до мене тоді, коли я закінчила останній рік в садочку в Рівному. Я мала йти до школи, як усі мої однолітки. Натомість одного дня мама повідомила мені, що ми їдемо до тата і житимемо вже нарешті з ним, в країні, назва якої нехай згине в мороці і яку не варто навіть називати. Це був 1989 рік, і до школи я пішла вже у 7 років.

Тато був унікальною людиною. Його розум малював на «паперах» цікаві та нікому не зрозумілі схеми, які він називав «деревами подій» та виводив незрозумілі формули, що встановлювали причинно-наслідкові зв'язки в нетрях тих дерев...

Тато самостійно вчив іноземні мови. Його особиста бібліотека ломилась від різноманітних спеціалізованих словників – технічних, фразеологічних тощо. З того, що я пам'ятаю особисто: він вчив англійську, французьку, італійську, фінську та естонську. Тоді не було SpringerLink, перекладачів, ШІ, а аспіранти досліджували потрібну їм інформацію з різних іноземних джерел, сидячи по науковим бібліотекам і користуючись іноземними словниками та своїми знаннями іноземних мов.

Одночасно із самостійним особистісним зростанням в іноземних мовах він муштрував мене, свою дочку. Таким чином англійська та французька мови стали моїм *must have* в щоденній рутині. Тоді я дуже мучилась з того, що тато «наполягає=примушує» зубрити незрозумілі слова. Наразі я роблю те саме зі своїми синами. Згадую з вдячністю і тепер уже з розумінням той період. Завдяки тому океану словників тато легко писав наукові статті англійською, єдиною перепоною для нього була розмовна мова, адже в часи його становлення як науковця практика прикладного розмовного спілкування іноземними мовами була дуже обмеженою. Він легко описував свої думки, але, на жаль, не говорив англійською.

Скільки себе пам'ятаю, тато завжди «працював вдома», був якийсь маленький період, коли він ходив

Yuliia STEFANYSHYNA-HAVRYLIUK

MEMORIES OF MY FATHER

Dmytro Volodymyrovych lived solely for the science; everything else in my father's life seemed to exist in a parallel reality that contained only three components: family, forest and fishing.

The memories of a little six-year-old girl: her 28-year-old father is typing "papers" on a typewriter, and I am sitting under the table and playing with the sheets that in fact were notes for his future PhD dissertation.

In general, I only realized that my father had a "strange job" and a "strange profession" when I graduated from the kindergarten in Rivne. I was supposed to go to school, like all my peers. Instead, one day my mother told me that we were going to join my father and would finally live with him in a country whose name, let it fade into darkness, is not even worth mentioning. It was 1989, and I started school at the age of seven.

My father was a unique person. His mind sketched on "papers" curious and incomprehensible schemes that he called "event trees," and he derived mysterious formulas that established cause-and-effect relationships in the depths of those trees…

Father taught himself foreign languages. His personal library was bursting with all sorts of specialized dictionaries – technical, phraseological, etc. From what I personally remember, he was learning English, French, Italian, Finnish and Estonian. At that time there was no SpringerLink, no online translators, no AI, and postgraduate students searched for the information they needed in various foreign sources by sitting in scientific libraries and using foreign dictionaries and their own knowledge of foreign languages.

Alongside his own personal development in foreign languages, he drilled me, his daughter. Thus, English and French became my daily must-have routine. Back then I suffered a lot because my father "insisted = forced" me to memorize incomprehensible words. Now I do exactly the same with my own sons. I recall that period with gratitude and, now, with understanding. Thanks to that ocean of dictionaries my father could easily write scientific articles in English; the only barrier for him was spoken language, because in the years of his formation as a scientist, the practice of applied spoken communication in foreign languages was very limited. He could easily set out his ideas in writing, but, unfortunately, he did not speak English.

For as long as I can remember, my father always "worked from home." There was some short period when he went to

«в офіс», університет, раз на пару місяців їздив до Києва до інституту при НАН України, але загалом, до свого останнього дня він працював вдома. Графік роботи – ненормований. Тато працював тоді, коли ІДЕЯ починала вимальовуватися в голові, тоді руки друкували по клавіатурі або малювали на папері схеми і писали формули. Дуже часто бувало, що цілий день тато спав або гуляв в улюбленому Бармаківському заповідному урочищі, збираючи ягоди або яблука, а потім вночі приходила ІДЕЯ. І він починав її записувати і занотовувати основні важливі думки. В цьому був весь мій тато. Він працював лише тоді, коли ІДЕЯ або РІШЕННЯ заполоняли його РОЗУМ…

Наука, сім'я, ліс і риболовля. Певно такою була шкала його пріоритетів. Це звісно моя особиста думка, але інколи мені починає здаватися, що риболовля перевершувала все!

Тато полюбляв рибалити саме на річках. Річки манили його. Левову частку наукових робіт доктора Стефанишина становили дослідження, так чи так пов'язані з річками. Тому поставити вудку-донку та зловити одинадцятикілограмового хижака сома, руками витягаючи цю звірюку з Горині, завжди було справою честі для тата. Коли він приходив з такою здобиччю додому, то щастю його не було меж. Найбільших своїх сомів тато ловив у районі селищ Шубків і Тучин Рівненської області.

Цікавий спогад пов'язаний з риболовлею: після дощу тато ходить, збирає хробаків на наживку. Хробаків тримає у відерці із землею в холодильнику до наступного походу. Тато забуває закрити відерце, і хробаки вже повзають по всьому холодильнику. Своїх друзів я попереджала, що якщо вони побачать ввечері після дощу чоловіка з ліхтариком і пакетиком, який щось шукає, то щоб вони не переживали, що це якийсь маніяк, бо це мій тато збирає хробаків на риболовлю!

Якось я стала свідком того, як тато забирав хробака у жаби. Виймав прямо з пащеки. Як він пояснив: «Щоб вона бідолашна не вдавилась». Хто знав тата, той у курсі, що він обожнював ЖАБ, тому він дійсно переживав за амфібію, забираючи в неї «завелику» здобич.

Є ще маловідомі факти про тата. Тато обожнював астрономію та мінералогію. Тому в мене на стіні усе дитинство висіла карта зоряного неба, у нас був простенький телескоп, в який ми роздивлялися Чумацький шлях, місяць, і тато мав колекцію мінералів, які він ще за молоду в різноманітних походах збирав. У тата були ВАЛІЗИ З КАМІНЦЯМИ. Майже усі вони були чудовими екземплярами. І вже будучи дорослою, я знайшла цим камінцям гарне застосування в дизайні свого помешкання. Завдяки татовим вподобанням та хобі я ще дитиною знала такі слова як: слюда, гірський кришталь, лабрадорит, малахіт, кілопарсек та секстант.

an "office," to the university, and once every couple of months he travelled to Kyiv to the Institute of the NAS of Ukraine, but in general, until his last day he worked from home. His work schedule was irregular. Father worked whenever an IDEA began to take shape in his head; then his hands would start typing on the keyboard or drawing schemes on paper and writing formulas. Very often it happened that he slept all day or walked in his beloved Barmaky Protected Tract, picking berries or apples, and then at night the IDEA would come. And he would begin to write it down, to note the key important thoughts. That was my father in a nutshell. He worked only when the IDEA or the SOLUTION seized his MIND…

Science, family, forest and fishing. That was probably his scale of priorities. Of course, this is my subjective opinion, but at times I catch myself thinking that fishing outweighed everything!

Father especially loved fishing on rivers. Rivers attracted him. The lion's share of Dr. Stefanyshyn's scientific works consisted of studies in one way or another related to rivers. Therefore, to set a bottom rod and catch an eleven-kilogram predatory catfish, hauling this beast out of the Horyn with his bare hands, was always a matter of honour for him. When he came home with such a trophy, his happiness knew no bounds. He caught his biggest catfish precisely in the area of the villages of Shubkiv and Tuchyn in Rivne region.

I have one vivid memory related to fishing: after rain my father would go out to collect worms for bait. He kept the worms in a small bucket with soil in the fridge until the next trip. Father once forgot to close the bucket, and the worms crawled all over the refrigerator. I used to warn my friends that if, in the evening after rain, they saw a man with a flashlight and a plastic bag looking for something, they should not worry that it was some maniac – it was just my father collecting worms for fishing!

Once I witnessed my father taking a worm away from a frog – literally pulling it out of its mouth. As he explained: "So that the poor thing doesn't choke." Those who knew my father are aware that he adored FROGS, so he was genuinely worried about the amphibian, taking away "too large" a catch from it.

There are also little-known facts about my father. He adored astronomy and mineralogy. Throughout my childhood, a map of the starry sky hung on my wall, we had a simple telescope through which we looked at the Milky Way and the Moon, and my father had a collection of minerals that he had gathered in various hikes when he was young. My father had SUITCASES FULL OF STONES. Almost all of them were wonderful specimens. And already as an adult I found a good use for these stones in the interior design of my home. Thanks to my father's tastes and hobbies, as a child I already knew words such as mica, rock crystal, labradorite, malachite, kiloparsec and sextant.

Мій тато був вільною людиною, бо ніколи не зраджував своїм переконанням, обрав науку сенсом життя, знаючи, що на Батьківщині наука далеко не в пошані. Ще будучи аспірантом, тато мав декілька різних робіт, але кожна з них була пов'язана з наукою. Він брався за будь-яку наукову роботу, пов'язану зі специфічною галуззю, в якій він працював, навіть знаючи, що йому ніколи її не оплатять. Знайти РІШЕННЯ було його пріоритетом.

Він ніколи не ганявся за «титулами», «званнями», «досягненнями», це все було не важливим для нього. Тато ЗАРОБЛЯВ НА ЖИТТЯ СВОЇМ БЛИСКУЧИМ РОЗУМОМ, який працював як магічний інструмент, видаючи в підсумку відмінні дослідження, статті, проекти, експертні висновки тощо.

Вірю, що учні Дмитра Стефанишина, з якими тато тісно співпрацював і яким приділяв безліч особистого часу, з якими провів безліч годин бесід, настанов, продовжать його справу і пам'ятатимуть свого Вчителя.

Рівне, травень 2025 р.

My father was a free person because he never betrayed his convictions. He chose science as the meaning of his life, fully aware that in our homeland science is far from being properly valued. Even as a postgraduate student, he had several different jobs, but each of them was connected with science. He took on any scientific work related to the specific field in which he worked, even knowing that he might never be paid for it. Finding a SOLUTION was his priority.

He never chased after "titles," "ranks," or "achievements" – all that was unimportant to him. Father EARNED HIS LIVING WITH HIS BRILLIANT MIND, which worked like a magic instrument, ultimately producing excellent studies, articles, projects, expert opinions, and more.

I believe that the students of Dmytro Stefanyshyn, with whom he closely cooperated and to whom he devoted countless hours of his personal time, with whom he spent many hours in conversation and guidance, will continue his work and will remember their Teacher.

Rivne, May 2025

ЗМІСТ

Секція № 1
ЗАГАЛЬНА ЕКОЛОГІЯ

Наталія БЕРТОШ МІКРОПЛАСТИК У ПИТНІЙ ВОДІ ТА ЇЖІ – ЗАГРОЗА ЗДОРОВ'Ю ЛЮДИНИ …..**24**

Альона БУНАС, Ігор МОВЧАН, Олена ШЕРСТОБОЄВА, Євгенія ТКАЧ БІОДЕСТРУКТОРИ ЯК РУШІЇ ЕВОЛЮЦІЇ ҐРУНТОВИХ ЕКОСИСТЕМ ……...**31**

Володимир ДВОРЕЦЬКИЙ, Альона БУНАС, Кирил БОНДАРЕНКО, Михайло ДВОРЕЦЬКИЙ ВЗАЄМОДІЯ ВИСОКОБІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ШТАМІВ МІКРООРГАНІЗМІВ ІЗ КОРЕНЕВОЮ ПОВЕРХНЕЮ РОСЛИН …..…… **39**

Софія ІВКО, Юлія ЛУЧАКІВСЬКА МІКРОКЛОНАЛЬНЕ РОЗМНОЖЕННЯ РОСЛИН АРАУКАРІЇ З МЕТОЮ ПОДАЛЬШОГО АНАЛІЗУ ЇХ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ …….. **43**

Наталія КРЮЧЕНКО, Едуард ЖОВИНСЬКИЙ, Петро ПАПАРИГА МАКРОКОМПОНЕНТНИЙ СКЛАД РІЧКОВИХ ВОД ЗАПОВІДНИХ ЗОН ЯК ЕКОЛОГІЧНИЙ ІНДИКАТОР (НА ПРИКЛАДІ КАРПАТСЬКОГО БІОСФЕРНОГО ЗАПОВІДНИКА) ……..…….... **48**

Ірина КУРАЄВА, Тетяна КОШЛЯКОВА, Анастасія СПЛОДИТЕЛЬ, Олена ДЕРЮГІНА, Олександр АЗІМОВ, Людмила ЛЕМЕШ ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ У БІОГЕОЦЕНОЗАХ ПРИРОДНИХ ТА УРБАНІЗОВАНИХ ЛАНДШАФТІВ ЛІСОСТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ …….…….... **55**

Віталій НЕСІН МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ: ОГЛЯД ВПЛИВУ НА ПЕРСОНАЛ ТА СТРАТЕГІЯ ЗАХИСТУ …… **61**

Єлизавета ПРОХОРОВА, Наталія ЩЕРБАК, Пірс ХЕМСЛІ «ЗЕЛЕНЕ» ВИРОБНИЦТВО ТА АНАЛІЗ ЦІННИХ ТЕРАПЕВТИЧНИХ БІЛКІВ У ЇСТІВНИХ РОСЛИНАХ…… **66**

Олександр ТАШИРЕВ, Віра ГОВОРУХА, Галина ГЛАДКА, Ірина БІДА, Ілля КОСТЮК ТЕРМОДИНАМІЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ БІОТЕХНОЛОГІЙ ……..……..……**71**

Анастасія ФОМЕНКО, Оксана БОНДАРЕНКО ВПЛИВ НАДЛИШКОВОГО ВМІСТУ ЦИНКУ В СЕРЕДОВИЩІ КУЛЬТИВУВАННЯ НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ПРОРОСТКІВ РОСЛИН ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ТА СТАН ФОТОСИНТЕТИЧНОГО АПАРАТУ В КЛІТИНАХ ……..... **77**

Секція. 2
ТЕХНОЕКОЛОГІЯ

Лауріс АРБІДАНС ВИКОРИСТАННЯ БОЄПРИПАСІВ ІЗ ЗБІДНЕНИМ УРАНОМ У СУЧАСНИХ ВІЙНАХ — ЗАГРОЗА ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ?.....**84**

Владислав БАЛІНСЬКИЙ, Руслан ГАВРИЛЮК, Віталій ГУЛЕВЕЦЬ, Міхаела ТІМОФТІ ІНТЕГРОВАНА МЕТОДИКА ТРАСУВАННЯ НАФТОВИХ ШЛЕЙФІВ ЗА ДАНИМИ SENTINEL-1 ТА SENTINEL-2: ЗВОРОТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТЕОКОРЕКЦІЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ…….…….....**88**

Олександр БОНДАРЧУК, Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ, Лариса СПАСЬОНОВА, Андрій МОКІЄНКО, Роман БОХЕНЕК МОНІТОРИНГ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЧИСЛОВИХ РЯДІВ ЯКОСТІ ВОДИ, ЗНЕЗАРАЖЕНОЇ ДІОКСИДОМ ХЛОРУ……..... **97**

Дмитро БУГАЙ, Дмитро ГРИГОРЕНКО МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МОНИТОРИНГУ ПІДЗЕМНИХ ВОД У ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС: ВИКЛИКИ ТА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ…….. **104**

Валерія ВЕМБЕР, Олена ЛАВРИНЕНКО, Михайло БОНДАРЕНКО ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ ҐРУНТОВОЇ МІКРОБІОТИ НА НАФТОВЕ ЗАБРУДНЕННЯ……..…..**109**

Богдан ВОЩЕНКО, Вячеслав РАДОВЕНЧИК, Олексій ТОМІН ВИДАЛЕННЯ ІОНІВ МАГНІЮ З ВОДИ В ЕЛЕКТРОЛІЗЕРАХ З ДІАФРАГМОЮ……..……. **117**

Валерій ГАЄВСЬКИЙ, Віктор ФИЛИПЧУК, Олексій ГАРАЩЕНКО, Людмила СОЛЯК ТЕХНОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВИКИДІВ ДІОКСИДУ СІРКИ ВІД СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ БАСЕЙНІВ УКРАЇНИ…….……**123**

Людмила ГАПОНИЧ, Олександр ТОПАЛ, Ірина ГОЛЕНКО, Максим ЛЮБАРЕЦЬ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ДЕРЕВИНИ ЛИПИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОГРАВІМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ У ПОВІТРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩІ…….**128**

Красімір ГЕОРГІЄВ БУДІВЛІ З МАЙЖЕ НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ (NZEB) – СТАЛИЙ ШЛЯХ У МАЙБУТНЄ ЗАБУДОВИ ТА БОЛГАРСЬКИЙ ДОСВІД….**136**

Ольга ГЛУШКО ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ НАНОКАТАЛІЗАТОРІВ НА ОСНОВІ СПОЛУК МАНГАНУ У ВОДНЕВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ……..…..…... **143**

Сергій ГУЛІЄНКО, Віталій ЯСЕНЬЧУК, Костянтин ГАТІЛОВ ПОПЕРЕДНЯ ОЦІНКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СПЕЙСЕРА МЕМБРАННОГО МОДУЛЯ……..……. **148**

Олексій ГУМЕНЮК ХІМІЧНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ…….…….. **152**

Ірина ДРОНОВА ЧУТЛИВІСТЬ ЗЕЛЕНОСТІ МІСЬКОГО ЛАНДШАФТУ ДО ПРОСТОРОВОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОПУЛЯРНИХ ПРОДУКТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ……..…… **158**

Вікторія ДРОЩИНСЬКА, Ігор БИЧКО, Олена ІВАНЕНКО ВСТАНОВЛЕННЯ СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОВУГЛЕЦЕВИХ КАТАЛІЗАТОРІВ ДЛЯ ПОТРЕБ ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ…….**165**

Ольга ЗАБНЄВА, Дмитро ПІНЧУК, Сергій СМОЛІН, Ольга ШВИДЕНКО ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ОТРИМАННЯ КАРБОНІЗОВАНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ БІОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ СИРОВИНИ……**172**

Олена ІВАНЕНКО, Богдан КОРІНЕНКО, Ігор БИЧКО, Кароліна ВОЙТЕНКО, Артем МАРТИНЮК КАТАЛІТИЧНИЙ ШВИДКИЙ ПІРОЛІЗ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ……**175**

Софія ІГНАТЕНКО, Інна ГУТАК, Оксана ПАВЛЕНКО ВИКОРИСТАННЯ ПОРТАТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ НА ПРИКЛАДІ КРИНИЧНОЇ ВОДИ ШОСТКИНСЬКОЇ ГРОМАДИ……...……**181**

Гвідас ЙОКУБАУСКАС, Егідіюс ГРІШКОНІС, Ремігіюс ІВАНАУСКАС, Гінтарас ДЕНАФАС ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНЕ ВИДОБУВАННЯ МЕТАЛІВ З ДРУКОВАНИХ ПЛАТ……..**187**

Ростислав КАРПЕНКО, Микола ГОМЕЛЯ ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ……..……..…….....**192**

Василь КОРБУТЯК, Ігор СТАТНИК, Віктар ФЯНЧУК, Ярослав ХОДНЕВИЧ, Даніель БЕНАТОВ, Анатолій ЛІЩИНСЬКИЙ ВПЛИВ МЕРЕЖІ КАНАЛІВ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ БОЛОТНОГО МАСИВУ СОМИНЕ В КОНТЕКСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ЙОГО ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ……... **196**

Дмитро КОРОБІЙ, Олександр ХОХОТВА ПОШУК НОВИХ ЕКОНОМІЧНО ДОСТУПНИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВОДОЙМ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ..……..**203**

Микола КОСМИНА, Юлія НОСАЧОВА ПОРІВНЯННЯ ВПЛИВУ ІОНІВ ЗАЛІЗА І МІДІ НА ПРОЦЕСИ ЗНЕКИСНЕННЯ ВОДИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ 20 ºС З ВИКОРИСТАННЯМ ГІДРАЗИНУ……...……**207**

Євгеній КОСТЕНКО, Тетяна ОБУШЕНКО, Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ, Наталія ТОЛСТОПАЛОВА, Ольга САНГІНОВА, Олександр БОЛЄЛИЙ ВПЛИВ СТОРОННІХ ІОНІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕФТОРУВАННЯ НА ФЕРУМВМІСНИХ АДСОРБЕНТАХ……...……...……**212**

Євгеній КОСТЕНКО, Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ, Тетяна ОБУШЕНКО, Наталія ТОЛСТОПАЛОВА, Ольга САНГІНОВА, Олександр ГРУШЕВСЬКИЙ ДЕЯКІ ПИТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД СПОЛУК ФТОРУ……... **218**

Андрейс КРАУКЛІС МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ МОДУЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ДОВКІЛЛЯМ…...…….. **224**

Яна КРИЖАНОВСЬКА, Микола ГОМЕЛЯ, Дарина ДУДКА ОТРИМАННЯ СПОЛУК ОКИСЛЕНОГО ХЛОРУ ІЗ РОЗЧИНІВ ХЛОРИДУ НАТРІЮ ЕЛЕКТРОДІАЛІЗОМ……...……**230**

Ольга ЛЕГОТІНА, В'ячеслав ГНАТЮК АНАЛІЗ ДИНАМІКИ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ У МІСТІ КИЄВІ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ (2023 РІК)…...…….**234**

Григорій ЛИЗАК, Даніїл ДРАГАН, Валерій БАРБАШ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ІЗ СТЕБЕЛ АМАРАНТУ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ПАПЕРУ І КАРТОНУ……...……**238**

Антон ЛИТВИН, Юлія НОСАЧОВА ВПЛИВ pH НА КОРОЗІЙНУ АГРЕСИВНІСТЬ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОДНО-НАФТОВИХ СЕРЕДОВИЩ……..…….... **245**

Сергій МИЛОКОСТ, Віта ГАЛИШ, Микола ГОМЕЛЯ ІНФРАЧЕРВОНА СПЕКТРОСКОПІЯ В ДОСЛІДЖЕННІ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕМБРАН З МОДИФІКОВАНОГО ЦЕЛЮЛОЗНОГО ВОЛОКНА…….....**249**

Гитіс МІЛЯУСКАС, Гінтарас ДЕНАФАС УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ СИРОВИНИ З БАГАТОШАРОВИХ КОМПОЗИТІВ……..……**253**

Євгеній МУКАЛО, Віта ГАЛИШ ПОКРАЩЕННЯ ВОЛОГОСТІЙКОСТІ МАКУЛАТУРНОГО ПАПЕРУ……...……**260**

Денис НЕВЧАС, Костянтин П'ЯНИХ ПЕРЕРОБКА ВУГЛЕЦЕВМІСНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА……..…… **263**

Кирил НОСАЧОВ, Ігор БИЧКО, Андрій ВАГІН, Олена ІВАНЕНКО КАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ МАРКИ ЕГСП У ГІДРУВАННІ ПОТРІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ С-С…….…… **267**

Андрій ПЕТЕЛЬКА, Людмила СКЛЯР ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТОНКО ПОДРІБНЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОНЦЕНТРАТІВ……...……... **273**

Сергій ПОРОШЕНКО, Олександр ХОХОТВА ПОВЕРНЕННЯ ХРОМУ ЗІ СТІЧНИХ ВОД У ВИРОБНИЦТВО: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ…… **278**

Костянтин П'ЯНИХ ЗАМІЩЕННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА ШЛЯХОМ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВОМІСНОЇ СИРОВИНИ…….. **281**

Олександр СНІГУР, Тетяна ОВЕРЧЕНКО, Олена ІВАНЕНКО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДИХ КОМБІНОВАНИХ ПАЛИВ……...…….. **286**

Дмитро СТЕФАНИШИН, Ярослав ХОДНЕВИЧ, Олександр ТРОФИМЧУК, Василь КОРБУТЯК, Даніель БЕНАТОВ ЗАДАЧІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ…….……**293**

Альона ТАРАСОВА, Андрій КУШМИРУК, Олексій КОСОГІН ОКСИДНОМЕТАЛЕВИЙ ЕЛЕКТРОД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СПОЛУК ГІДРАЗИНУ..... **300**

Гліб ТЕТЕРЯТНИКОВ, Олена ІВАНЕНКО, Антон КАРВАЦЬКИЙ, Олексій ТОМІН МОДЕЛЮВАННЯ ПІРОЛІЗУ ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ СИЛОВОГО ПОЛЯ REAXFF……..……**306**

Білал ТУСІФ, Гінтарас ДЕНАФАС АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ МАКРОЕЛЕМЕНТІВ У КОМПОСТІ ЗМІШАНИХ МУНІЦИПАЛЬНИХ БІОРОЗКЛАДНИХ ВІДХОДІВ (ЗМБВ): НА ПРИКЛАДІ РЕГІОНІВ КАУНАСА, АЛИТУСА ТА ДАУГАВПІЛСА……..……....**309**

Станіслав УСЕНКО, Юлія НОСАЧОВА, Євгеній ШАПОВАЛОВ, Максим КЛИМЕНКО, Сергій ЖАДАН ВИКОРИСТАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПРОЦЕСАХ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ…… **314**

Ті-Хань ХА, Яо-Хуей ХУАНГ, Мін-Чун ЛУ ЗАСТОСУВАННЯ МАЛОРОЗЧИННОГО ДОЛОМІТОВОГО МІНЕРАЛУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ФОСФОРУ……..…… **319**

Лариса ЧЕРНЯК, Тетяна ДМИТРУХА, Дар'я ЗАБОЛОТНА, Ольга ГРАМА, Ілона МИХАЛЬЧУК , Томаш МАНЄЦКІ, Радослав ЧЕШЕЛЬСЬКІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ ЗАБРУДНЕНИХ АВІАЦІЙНИМ ПАЛИВОМ……..**321**

Романія ЧЕРЬОПКІНА, Віталій КИСЛИЙ, Кіріл НЕЛІДОВ, Максим НАУМЕНКО ВІДХОДИ ТОПІНАМБУРА У ВИГЛЯДІ СТЕБЕЛ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВОЛОКНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ……..…….. **325**

Юлія ЧЕСТНИХ, Олена КОСОБУЦЬКА, Ганна ТРОХИМЕНКО ЗАСТОСУВАННЯ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО КОАГУЛЯНТУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ҐРУНТІВ……...…… **331**

Ольга ШЛІХТЕР, Артур КОСОГІН, Ірина КОСОГІНА РЕГЕНЕРАЦІЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МЕМБРАН ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ…….…… **334**

Костянтин ЯРОШЕНКО, Ірина КОЛЯБІНА, Володимир САПРИКІН, Надія МОЛОЧКОВА, Єгорій ДРАМАРЕЦЬКИЙ ОСОБЛИВОСТІ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ТЕРИТОРІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО ЗАПОВІДНИКА «СОФІЯ КИЇВСЬКА»……..……**339**

Секція. 3
СТРАТЕГІЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ У КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Поліна БЕЗУГЛА, Данило БЕНАТОВ ПРОЦЕДУРИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО АУДИТУ ЯК ЕФЕКТИВНІ ІНСТРУМЕНТИ ДОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВ……..**347**

Юріс БУРЛАКОВС, Маріс КРІЕВАНС, Зане ВІНЦЕВІЦА-ҐАЙЛЕ, Інга ГРІНФЕЛДЕ, Мартінс ВІЛНІТІС ДИСКУРС ЩОДО ЕВОЛЮЦІЇ МЕГАПОЛІСІВ: УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ ПОТОКАМИ ЗАБРУДНЕННЯ, ЗМІНАМИ КЛІМАТУ ТА ПРОГНОЗНОЮ МОДЕЛЛЮ ДАНИХ ДЛЯ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ……..**350**

Андрій ВАГІН, Олена ІВАНЕНКО, Артем МАРТИНЮК СТАЛИЙ РОЗВИТОК ПРАТ «УКРГРАФІТ» У ПЕРІОД ВОЄННОГО КОНФЛІКТУ…… **359**

Валерія ВЕМБЕР, Тетяна ШАБЛІЙ, Олена ГЛУШКО, Тимур БЕРЛИМ ПІДВИЩЕННЯ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ШЛЯХОМ ЗАМІНИ ТРАДИЦІЙНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯМИ……...**364**

Руслан ГАВРИЛЮК, Євген НАСЄДКІН, Ольга ЛОГВИНЕНКО, Ганна ІВАНОВА, Гінтарас ЖАРЖОЮС, Вітаутас САМАЛАВІЧЮС, Іева ЛЕКСТУТИТЄ ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ВНАСЛІДОК РУЙНУВАННЯ ЦИВІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗБЕРІГАННЯ НАФТОПРОДУКТІВ В ХОДІ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ……...**372**

В'ячеслав ГНАТЮК, Тетяна ШАБЛІЙ, Олександра ШАБЛІЙ АТМОСФЕРНЕ НАВАНТАЖЕННЯ В УРБОЕКОЛОГІЧНОМУ ВИМІРІ: ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ У 2021-2022 РОКАХ…….....**373**

Іван ГЕТЬМАН ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЯК РУШІЙ СТАЛОГО ТА ЦИКЛІЧНОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ: ДОСЯГНЕННЯ В ПОЛІТИЦІ, ТЕХНОЛОГІЯХ І НАУЦІ……**381**

Євгенія ЛИПНИЦЬКА ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА РОЛЬ ВИКЛАДАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН ЕКОЛОГО-ПРАВОВОГО СПРЯМУВАННЯ У ПІДГОТОВЦІ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ……..…..……**388**

Маріам МАРІП, Юріс БУРЛАКОВС, Мохамад Нор АЗРА ГАЛОФІТИ В ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД У АКВАКУЛЬТУРНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ: МАЛАЙЗІЙСЬКИЙ ПРИКЛАД ПРИРОДООРІЄНТОВАНИХ РІШЕНЬ……...……**394**

Віктор ПУТРЕНКО, Наталія ПАШИНСЬКА РОЗРОБКА БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ГЕОПРОСТОРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ЗМІН КЛІМАТУ……...**400**

Маргарита РАДОМСЬКА, Нікіта КЛИМЕНКО ДОСЛІДЖЕННЯ СПОЖИВАЦЬКИХ ПРАКТИК ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ СВІДОМОСТІ СЕРЕД СТУДЕНТІВ ПІД ВПЛИВОМ ТРЕНДІВ ШВИДКОЇ МОДИ……..... **406**

Олена СОРОЧИНСЬКА РАЦІОНАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ: НОВІ ПІДХОДИ ТА ПРАКТИКИ…….. **410**

Арсеній ХАЦЕЙ, Інна ТРУС ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ……**415**

CONTENTS

Section № 1
GENERAL ECOLOGY

Nataliia BERTOSH MICROPLASTICS IN DRINKING WATER AND FOOD: A THREAT TO HUMAN HEALTH……....**24**

Alyona BUNAS, Igor MOVCHAN, Olena SHERSTOBOEVA, Yevhenia TKACH BIODESTROYERS AS DRIVERS OF EVOLUTION OF SOIL ECOSYSTEMS…… **31**

Volodymyr DVORETSKYI, Alyona BUNAS, Kirill BONDARENKO, Mykhailo DVORETSKYI INTERACTION OF HIGHLY BIOTECHNOLOGICAL STRAINS OF MICROORGANISMS WITH THE ROOT SURFACE OF PLANTS……**39**

Sofiia IVKO, Yuliya LUCHAKIVSKA MICROCLONAL REPRODUCTION OF ARAUCARIA PLANTS FOR THE ANALYSIS OF THEIR PHYTOREMEDIATION POTENTIAL…….. **43**

Nataliya KRYUCHENKO, **Eduard ZHOVYNSKY**, **Petro PAPARYGA** MACROCOMPONENT COMPOSITION OF RIVER WATERS OF PROTECTED AREAS AS AN ENVIRONMENTAL INDICATOR (ON THE EXAMPLE OF THE CARPATHIAN BIOSPHERE RESERVE)…… **48**

Iryna KURAIEVA, Tetiana KOSHLIAKOVA, Anastasia SPLODYTEL, Olena DERIUHINA, Olexander AZIMOV, Ludmila LEMESH PATTERNS OF MICROELEMENTS DISTRIBUTION IN BIOGEOCENOSES OF NATURAL AND URBANIZED LANDSCAPES OF THE FOREST-STEP ZONE OF UKRAINE……**55**

Vitalii NESIN NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS UTILIZING ELECTROMAGNETIC RADIATION: A REVIEW OF PERSONNEL EXPOSURE AND PROTECTION STRATEGIES…… **61**

Yelizaveta PROKHOROVA, Nataliia SHCHERBAK, Piers HEMSLEY HEMSLEY GREEN PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF HIGH-VALUE THERAPEUTIC PROTEINS IN EDIBLE PLANTS……..……**66**

Oleksandr TASHYREV, Vira HOVORUKHA, Galyna GLADKA, Iryna BIDA, Illia KOSTIUK THERMODYNAMIC PREDICTION FOR CREATION OF NOVEL ENVIRONMENT BIOTECHNOLOGIES…….. **71**

Anastasya FOMENKO, Oksana BONDARENKO THE EFFECT OF EXCESS ZINC CONTENT IN THE CULTIVATION MEDIUM ON THE MAIN PARAMETERS OF WINTER WHEAT SEEDLINGS AND THE STATE OF THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS IN THE CELLS……**77**

Section № 2
TECHNOECOLOGY

Lauris ARBIDANS DEPLETED URANIUM AMMUNITION USE IN MODERN WARFARE – A CONCERN FOR ENVIRONMENT POLLUTION?.....**84**

Vladyslav BALINSKYY, Ruslan HAVRYLIUK, Vitalii HULEVETS, Mihaela TIMOFTI DEPLETED URANIUM AMMUNITION USE IN MODERN WARFARE – A CONCERN FOR ENVIRONMENT POLLUTION?.....**88**

Oleksandr BONDARCHUK, Arcady SHAHNOVSKY, Larysa SPASONOVA, Andrii MOKIIENKO, Roman BOCHENEK TIME-SERIES ANALYSIS-BASED QUALITY MONITORING OF WATER, DISINFECTED WITH CHLORINE DIOXIDE….....**97**

Dmitri BUGAI, Dmytro HRYHORENKO MODERNIZATION OF GROUNDWATER MONITORING SYSTEM IN THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE: CHALLENGES AND IMPLEMENTATION OF INTERNATIONAL STANDARDS……**104**

Valeriia VEMBER, Olena LAVRYNENKO, Mykhailo BONDARENKO STUDY OF SOIL MICROBIOTA RESPONSE TO OIL POLLUTION……..**109**

Bohdan VOSHCHENKO, Viacheslav RADOVENCHYK, Oleksii TOMIN REMOVAL OF MAGNESIUM IONS FROM WATER IN DIAPHRAGM ELECTROLYZERS……...**117**

Valery GAYEVSKII, Viktor FYLYPCHUK, Oleksiy GARASHCHENKO, Ludmila SOLIAK TECHNO-ECOLOGICAL ASSESSMENT OF SULPHUR DIOXIDE EMISSIONS FROM COAL COMBUSTION IN UKRAINIAN BASINS…….... **123**

Liudmyla HAPONYCH, Oleksandr TOPAL, Iryna HOLENKO, Maksym LIUBARETS STUDY OF THE KINETICS OF THERMAL DECOMPOSITION OF LINDEN WOOD USING THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS IN AN AIR ATMOSPHERE….....**128**

Krasimir G. GEORGIEV NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB) – A SUSTAINABLE FUTURE FOR THE BUILT ENVIRONMENT AND BULGARIAN EXPERIENCE……**136**

Olha HLUSHKO PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF MANGANESE COMPOUND-BASED NANOCATALYSTS IN HYDROGEN ENERGY…….. **143**

Serhii HULIIENKO, Vitalii YASENCHUK, Kostiantyn GATILOV PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF NOVEL DESIGN OF THE SPACER FOR THE MEMBRANE MODULE…….. **148**

Oleksii HUMENIUK CHEMICAL AND PHYSICOCHEMICAL METHODS FOR MEASURING CORROSION RATE……..**152**

Iryna DRONOVA SENSITIVITY OF URBAN LANDSCAPE GREENNESS TO SPATIAL RESOLUTION OF THE POPULAR REMOTE SENSING PRODUCTS……. **158**

Viktoriia DROSHCHYNSKA, Igor BYCHKO, Olena IVANENKO DETERMINATION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF NANOCARBON CATALYSTS FOR GREEN CHEMISTRY NEEDS…… **165**

Olga ZABNEVA, Dmytro PINCHUK, Serhii SMOLIN, Olga SHVYDENKO CONDITIONS RESEARCH OF OBTAINING CARBONIZED MATERIAL FROM BIO RENEWABLE RAW MATERIALS……...……**172**

Olena IVANENKO, Bohdan KORINENKO, Igor BYCHKO, Karolina VOJTENKO, Artem MARTYNIUK ATALYTIC PYROLYSIS OF WASTE POLYMER MATERIALS……**175**

Sofia IGNATENKO, Inna HUTAK, Oksana PAVLENKO USE OF PORTABLE FILTERS FOR PURIFICATION OF DRINKING WATER USING THE EXAMPLE OF SPRING WATER IN THE SHOSTKY COMMUNITY……**181**

Gvidas JOKUBAUSKAS, Egidijus GRIŠKONIS, Remigijus IVANAUSKAS, Gintaras DENAFAS HYDROMETALLURGICAL METAL EXTRACTION FROM PCBS… **187**

Rostyslav KARPENKO, Mykola GOMELYA ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATIONAL PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF REVERSE OSMOSIS SYSTEMS……**192**

Vasyl KORBUTIAK, Ihor STATNYK, Viktar FENCHUK, Yaroslav KHODNEVYCH, Daniel BENATOV, Anatolii LISHCHYNSKYI THE IMPACT OF THE DRAINAGE NETWORK ON SURFACE RUNOFF FORMATION IN THE SOMYNE MIRE IN THE CONTEXT OF HYDROLOGICAL REGIME RESTORATION…….. **196**

Dmytro KOROBIY, Oleksandr KHOKHOTVA SEARCH FOR NEW AFFORDABLE SORBENTS FOR PROTECTION OF WATER RESERVOIRS FROM POLLUTION……... **203**

Mykola KOSMYNA, Yuliia NOSACHOVA COMPARISON OF THE INFLUENCE OF IRON AND COPPER IONS ON WATER POLLUTION PROCESSES AT 20 ºC USING HYDRAZINE…… **207**

Evgeniy KOSTENKO, Tetiana OBUSHENKO, Arcady SHAHNOVSKY, Nataliia TOLSTOPALOVA, Olga SANGINOVA, Oleksandr BOLIELY INFLUENCE OF COMPETING IONS ON THE EFFICIENCY OF DEFLUORINATION ON IRON-CONTAINING ADSORBENT……**212**

Evgeniy KOSTENKO, Arcady SHAHNOVSKY, Tetiana OBUSHENKO, Nataliia TOLSTOPALOVA, Olga SANGINOVA, Oleksandr GRUSHEVSKYI SOME ISSUES ON COMPUTER SIMULATION AND OPTIMIZATION OF SORPTION-BASED TREATMENT OF FLUORIDATED WATER……...…**218**

Andrejs KRAUKLIS MATHEMATICAL MODULAR MODELING METHODS FOR SIMULATING MATERIAL – ENVIRONMENT INTERACTIONS (MEI)…… **224**

Yana KRYZHANOVSKA, Mykola GOMELYA, Daryna DUDKA OBTAINING OXIDIZED CHLORINE COMPOUNDS FROM SODIUM CHLORIDE SOLUTIONS BY ELECTRODIALYSIS **230**

Olga LEGOTINA, Viacheslav HNATIUK ANALYSIS OF AIR POLLUTION DYNAMICS IN KYIV UNDER MARTIAL LAW CONDITIONS (2023)…….**234**

Hryhorii LYZAK, Daniil DRAGAN, Valerii BARBASH TECHNOLOGIES FOR OBTAINING NANOCELLULOSE FROM AMARANTH STEMS AND ITS USE IN PAPER AND CARDBOARD PRODUCTION……**238**

Anton LYTVYN, Yuliia NOSACHOVA INFLUENCE OF pH ON THE CORROSIVE AGGRESSIVENESS OF MINERALIZED WATER-OIL ENVIRONMENTS…….**245**

Sergii MYLOKOST, Vita HALYSH, Mykola GOMELYA INFRARED SPECTROSCOPY IN THE RESEARCH OF STRUCTURAL FEATURES OF MEMBRANES MADE OF MODIFIED CELLULOSE FIBER……**249**

Gytis MILIAUSKAS, Gintaras DENAFAS PROCESS IMPROVEMENT ON RECOVERY OF RAW MATERIALS FROM MULTILAYER COMPOSITES……..**253**

Yevhenii MUKALO, **Vita HALYSH** IMPROVING THE MOISTURE RESISTANCE OF RECYCLED PAPER……...**260**

Denys NEVCHAS, Kostyantyn PYANYKH PROCESSING OF CARBON-CONTAINING WASTE FOR THE PRODUCTION OF GASEOUS FUELS……..**263**

Kiril NOSACHOV, Igor BYCHKO, Olena IVANENKO, Andrii VAHIN CATALYTIC POWER OF GRAPHITE ELECTRODES OF SLGE GRADE AT HYDRUVANCY TRIPLE CONNECTIONS C-C……. **267**

Andrii PETELKA, Lyudmila SKLYAR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE DEHYDRATION PROCESS OF FINELY GROUND IRON ORE CONCENTRATES**273**

Serhii POROSHENKO, Oleksandr KHOKHOTVA RECOVERY OF CHROMIUM FROM WASTEWATER INTO PRODUCTION: ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGIES AND APPLICATION PROSPECTS……...**278**

Kostiantyn PIANYKH SUBSTITUTION OF FOSSIL FUELS THROUGH THE GASIFICATION OF CARBON-CONTAINING RAW MATERIALS…….**281**

Oleksandr SNIGUR, Tetyana OVERCHENKO, Olena IVANENKO EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS OF GASIFICATION OF SOLID COMBINED FUELS……**286**

Dmytro STEFANYSHYN, Yaroslav KHODNEVYCH, Oleksandr TROFYMCHUK, Vasyl KORBUTIAK, Daniel BENATOV MATHEMATICAL MODELLING TASKS FOR HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT ESTIMATION USING NEURAL NETWORKS**293**

Alona TARASOVA, Andrii KUSHMYRUK, Oleksii KOSOHIN METAL OXIDE ELECTRODE FOR THE DETERMINATION OF HYDRAZINE COMPOUNDS…….**300**

Hlib TETERIATNYKOV, Olena IVANENKO, Anton KARVATSKII, Oleksii TOMIN MODELING THE PYROLYSIS OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE USING THE REAXFF FORCE FIELD……**306**

Bilal TOUSEEF, Gintaras DENAFAS ANALYSIS OF MACRONUTRIENTS DISTRIBUTION IN MIXED BIODEGRADABLE MUNICIPAL WASTE (MBMW) COMPOST: A CASE STUDY OF KAUNAS, ALYTUS, AND DAUGAVPILS REGIONS…….**309**

Stanislav USENKO, Yulia NOSACHOVA, Yevhenii SHAPOVALOV, Maksym KLYMENKO, Sergey ZHADAN USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES……**314**

Thi-Hanh HA, Yao-Hui HUANG, Ming-Chun LU APPLICATION OF LOW-SOLUBILITY DOLOMITE MINERAL FOR PHOSPHORUS RECOVERY……**319**

Larysa CHERNIAK, Tetiana DMYTRUKHA, Daria ZABOLOTNA, Olga HRAMA, Ilona MYKHALCHUK, Tomasz MANIECKI, Radoslaw CIESIELSKI INVESTIGATION OF SOIL REMEDIATION PROCESSES IN AREAS CONTAMINATED WITH JET FUEL…..**321**

Romaniia CHEROPKINA, Vitalii KISLY, Kirill NELIDOV, Maxim NAUMENKO JERUSALEM ARTICHOKE WASTE IN THE FORM OF STALKS FOR FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS……**325**

Yuliia CHESTNYKH, Olena KOSOBUTSKA, Ganna TROKHYMENKO APPLICATION OF RED SLUDGE AS AN ALTERNATIVE COAGULANT FOR WATER PURIFICATION AND RESTORATION OF DEGRADED SOILS……...**331**

Olga SHLIKHTER, Artur KOSOHIN, Iryna KOSOGINA REGENERATION OF USED REVERSE OSMOSIS MEMBRANES……...**334**

Kostiantyn YAROSHENKO, Iryna KOLIABINA, Volodymyr SAPRYKIN, Nadiia MOLOCHKOVA, Ehorii DRAMARETSKYI FEAUTERES OF THE GROUNDWATERS CHEMICAL COMPOSITION ON THE NATIONAL CONSERVATION AREA "SOPHIA OF KYIV" TERRITORY……**339**

Section № 3
SUSTAINABLE DEVELOPMENT STRATEGY IN THE CONTEXT OF ENVIRONMENTAL SAFETY

Polina BEZUGLA, Daniel BENATOV PROCEDURES FOR ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AND ENVIRONMENTAL AUDITING AS EFFECTIVE TOOLS FOR ENSURING ENTERPRISES' ENVIRONMENTAL SAFETY……..…… **347**

Juris BURLAKOVS, Maris KRIEVANS, Zane VINCEVICA-GAILE, Inga GRINFELDE, Martins VILNITIS DISCOURSE ON METROPOLITAN EVOLUTION: NAVIGATING URBAN POLLUTION FLUXES, CLIMATE CHANGE, AND THE DATA PREDICTIVE MODEL FOR GREEN INFRASTRUCTURE……..**351**

Andrii VAHIN, Olena IVANENKO, Yevgen PANOV, Artem MARTYNIUK SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF PJSC "UKRGRAPHITE" DURING THE MILITARY CONFLICT……..…**360**

Valeriia VEMBER, Tetyana SHABLIY, Olena HLUSHKO, Tymur BERLYM ENHANCING NATIONAL ENVIRONMENTAL SAFETY BY REPLACING TRADITIONAL VEHICLES WITH ELECTRIC CARS…….**365**

Ruslan HAVRYLIUK, Yevhen NASEDKIN, Olga LOGVYNENKO, Ganna IVANOVA, Gintaras ŽARŽOJUS, Ganna IVANOVA, Vytautas SAMALAVIČIUS, Ieva LEKSTUTYTĖ ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION RESULTING FROM THE DESTRUCTION OF CIVILIAN PETROLEUM STORAGE FACILITIES DURING MILITARY OPERATIONS…….**373**

Viacheslav HNATIUK, Tetiana SHABLIY, Aleksandra SHABLIY ATMOSPHERIC LOAD IN THE URBAN ECOLOGICAL DIMENSION: SPATIAL ANALYSIS OF UKRAINIAN REGIONS IN 2021–2022…….…….**378**

Ivan HETMAN TOWARDS A CIRCULAR AND SUSTAINABLE UKRAINE: LIFE CYCLE ASSESSMENT PROGRESS IN POLICY, TECHNOLOGY, AND ACADEMIA……**382**

Yevheniia LYPNYTSKA THE ECOLOGISATION (GREENING) OF HIGHER EDUCATION AND THE ROLE OF TEACHING ENVIRONMENTAL AND LEGAL COURSES IN THE TRAINING OF HIGHER EDUCATION STUDENTS……**389**

Mariam MARIP, Juris BURLAKOVS, Mohamad Nor AZRA THE ESTABLISHMENT AND DEVELOPMENT OF HALOPHYTES AS NATURE-BASED SOLUTIONS IN WASTEWATER TREATMENT FOR THE MALAYSIAN AQUACULTURE INDUSTRY…**395**

Viktor PUTRENKO, Nataliia PASHYNSKA DEVELOPMENT OF A DATABASE FOR THE PURPOSES OF GEOSPATIAL MODELING OF REGIONAL CLIMATE CHANGE…..**401**

Marharyta RADOMSKA, Nikita KLYMENKO THE STUDY OF CONSUMPTION PRACTICES AND ENVIRONMENTAL CONSCIOUSNESS AMONG THE STUDENTS UNDER THE EFFECT OF THE FAST FASHION TRENDS……..**407**

Olena SOROCHYNSKA RATIONAL WASTE MANAGEMENT: NEW APPROACHES AND PRACTICES……... **411**

Arsenii KHATSEI, Inna TRUS ENVIRONMENTAL ISSUES RELATED TO AUTOMOBILE TRANSPORT……**416**

Секція. 1
ЗАГАЛЬНА ЕКОЛОГІЯ

Section 1.
GENERAL ECOLOGY

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330195

МІКРОПЛАСТИК У ПИТНІЙ ВОДІ ТА ЇЖІ - ЗАГРОЗА ЗДОРОВ'Ю ЛЮДИНИ

Наталія БЕРТОШ
Національний технічний університет України
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: bertosh-fbmi@lll.kpi.ua

Анотація

У роботі розглянуто проблему мікропластикового забруднення як однієї з новітніх загроз для здоров'я людини. Особливу увагу приділено основним шляхам потрапляння мікропластикових і нанопластикових частинок в організм людини — через питну воду, продукти харчування, повітря та побутові джерела. Описано механізми токсичної дії мікропластику на різні системи органів, включаючи травну, дихальну, серцево-судинну, репродуктивну та імунну системи. Показано, що мікропластик здатен акумулювати токсичні речовини, порушувати гормональний баланс, викликати оксидативний стрес і запальні реакції. Робота спрямована на підвищення обізнаності та пошук шляхів мінімізації негативного впливу мікропластику на здоров'я.

Ключові слова*: мікропластик, нанопластик, питна вода, їжа, здоров'я людини, токсичність, навколишнє середовище, забруднення*.

За останнє десятиріччя мікропластик став об'єктом особливої уваги науковців, екологів і лікарів. Згідно з даними ВООЗ, мікропластик виявляється у 90% зразків бутильованої води, морській солі, фруктах, рибі, навіть у зразках грудного молока. Невидимі для людського ока пластикові частинки активно накопичуються в довкіллі та можуть проникати в людський організм через харчовий ланцюг, воду та повітря. Їхній вплив на здоров'я — від дисбалансу гормонів до потенційного канцерогенного ефекту — становить реальну загрозу, що потребує постійного моніторингу та розробки захисних стратегій.

Метою даної роботи є дослідження сучасних наукових джерел з питань походження мікропластику, шляхів його потрапляння в організм людини та потенційних негативних впливів на здоров'я. Також окреслено ключові напрямки подальших практичних досліджень у сфері екологічного моніторингу та розробки заходів для зниження ризиків, пов'язаних з мікропластиком.

Поняття мікропластику та його типи. Щороку світ виробляє дедалі більше пластику — лише у 2019-му його кількість сягнула 353 мільйонів тонн, а до 2060 року очікується трикратне зростання цього показника [1].

Мікропластик — це дрібні пластикові частинки, що утворюються в результаті розкладання пластмас [2].

Мікропластик класифікують за двома основними типами: первинний і вторинний. Первинний мікропластик — це дрібні пластикові частинки, спеціально виготовлені у вигляді мікрогранул діаметром менше 5 мм. Вони широко використовуються в промисловості, зокрема в текстильному виробництві, медицині, косметичних засобах і діагностичних матеріалах. Натомість вторинний мікропластик утворюється в результаті руйнування більших пластикових виробів, таких як пакування, пляшки, одяг з синтетичних тканин або інше сміття, під дією механічних, хімічних або атмосферних чинників, які розщеплюють їх на мікроскопічні фрагменти [1]. Такі фрагменти називають нанопластиком, їх розмір менше 1 мкм. Нанопдастик неможливо побачити неозброєним оком, вони достатньо малі, щоб проникати в клітини та тканини організму [3].

Шляхи потрапляння мікропластику в організм. Мікропластик поширений у всіх компонентах навколишнього середовища — у повітрі, питній воді, продуктах харчування, а також у річках, озерах і морях. Через надзвичайно малі розміри ці частинки легко проходять через системи очищення стічних вод, які не здатні ефективно їх затримувати, тим самим сприяючи їхньому поширенню. Характер переміщення мікропластикових частинок визначається їх фізико-хімічними властивостями, зокрема розміром, формою та щільністю полімеру [3].

Поглиблені міждисциплінарні дослідження, що проводяться в межах програм Європейського Союзу (Horizon Europe, PlasticsFatE, Imptox, MINAGRIS), дозволили ідентифікувати основні шляхи потрапляння мікропластикових частинок до організму людини [2] малюнок 1.

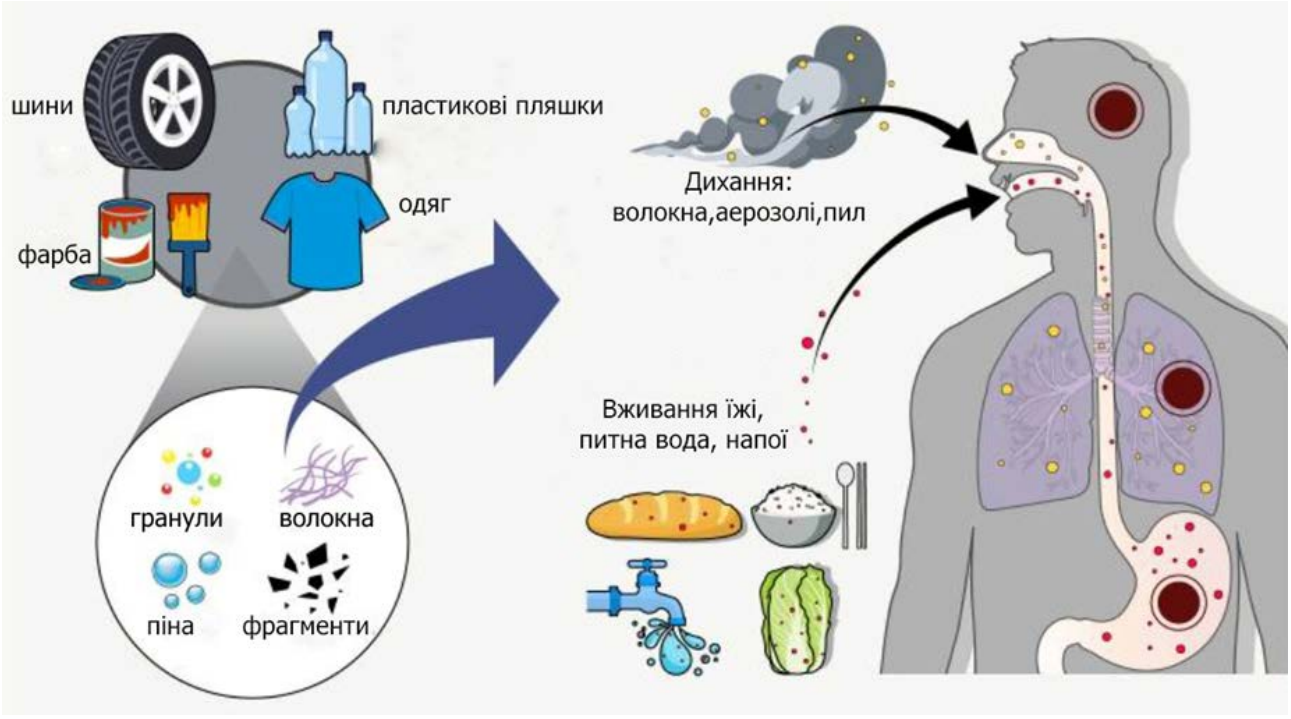


Рис. 1. *Шляхи потрапляння мікропластику в організм [5]*

Пероральний шлях (через їжу). Мікропластик виявляється в багатьох продуктах щоденного вжитку, зокрема у питній та бутильованій воді, морепродуктах, кухонній солі, цукрі, молочних продуктах, чаї (особливо у пакетиках), а також у готових стравах. За даними Європейського агентства з безпеки харчових продуктів, внаслідок споживання молюсків мешканці Європи

щороку піддаються впливу близько 11 000 мікропластикових частинок на людину. Загальне річне споживання мікропластику з продуктами харчування може становити від 39 000 до 52 000 частинок на людину [4].

Мікропластик також широко поширений у ґрунтах, особливо в сільськогосподарських системах. Частинки з негативним зарядом можуть проникати в рослини і транспортуватися від коренів до стебел, листя та плодів. Потрапляння мікропластику в агросистеми можливе через використання осадів стічних вод, компосту, пластикового мульчування та інших агротехнічних практик, що в свою чергу, сприяє забрудненню харчових продуктів і збільшує ризики впливу на здоров'я людини. [2].

Інгаляційний шлях (через дихання). Основними джерелами частинок у повітрі є стирання автомобільних шин, будівельних матеріалів, а також зношування синтетичного одягу. Значна частина мікропластику в атмосфері походить з дорожніх покриттів приблизно 84%. Атмосферне повітря в урбанізованих зонах містить переважно мікропластикові частинки та волокна, виготовлені з поліетилену, полістиролу і поліетилентерефталату, розмір яких варіює від 10 до 8000 мкм [5,6].

Концентрація мікропластикових волокон у повітрі міст коливається: близько 5,4 волокна на кубічний метр зовнішнього повітря і 0,9 — у приміщеннях. Загальна кількість частинок, що людина може вдихнути і проковтнути за рік, може сягати від 74 000 до 121 000. [6].

Найдрібніші частинки розміром менше 10 мкм здатні проникати до нижніх дихальних шляхів, включно з альвеолами. Це може призводити до хронічного запалення, розвитку фіброзу, оксидативного стресу, а також запуску імунопатологічних реакцій, що підтверджено дослідженнями *in vivo* [3].

Трансдермальний шлях (контакт через шкіру). Порівняно з іншими шляхами потрапляння мікропластику в організм людини, трансдермальний залишається недостатньо вивченим. Загалом вважається, що мікропластик не здатен проникати крізь непошкоджений епідермальний бар'єр шкіри, проте певні умови можуть підвищити ризик його впливу. Наприклад, осідання мікропластикових частинок на поверхню шкіри може призводити до абсорбції пластичних добавок, таких як бромовані антипірени, бісфеноли, триклозан та фталати [3].

Побутові джерела мікропластику, зокрема косметичні засоби — креми, лосьйони та засоби для вмивання — часто містять поліетиленові мікрогранули, що підвищує ризик прямого контакту з ними. Інші джерела включають зношування пластикових предметів (наприклад, чохлів для мобільних телефонів) [2].

Хоча сам мікропластик є гідрофобним і має обмежену здатність до проникнення через роговий шар, наночастинки розміром менше 100 нм можуть долати епідермальний бар'єр [2].

В експериментальних моделях показано, що полімерні частинки (наприклад, полістирол розміром 20–200 нм) здатні накопичуватися у волосяних фолікулах, причому менші частинки демонструють більший ступінь проникнення. Крім того, дослідження *in vivo* показали, що капсульовані частинки поліетилен розміром менше 10 мкм не викликають істотного запалення після тривалого підшкірного введення, на відміну від часток полівінілхлориду, стабілізованих токсичними добавками, які спричиняють дегенеративні зміни [7].

Отже, хоча трансдермальний шлях надходження мікропластику до організму вважається менш значущим, ніж пероральний чи інгаляційний, наявні дані вказують на його потенційну роль. Тому подальші дослідження потрібні для повного розуміння механізмів проникнення наночастинок через шкіру та їхнього можливого впливу на здоров'я людини [8].

Біологічний вплив мікропластику на організм. Загальноприйнято вважати, що після потрапляння в організм людини мікропластику, він може виводиться через шлунково-кишковий тракт та жовчні шляхи.

Вплив на травну систему. Мікропластикові частинки після потрапляння в організм можуть системно розповсюджуватися кровообігом та акумулюватися в різних органах і тканинах. На сьогодні мікропластик виявлено щонайменше в 15 органах людини, серед яких селезінка, печінка, товста кишка, легені та плацента. Найвищу концентрацію частинок зафіксовано в товстій кишці — 28,1 частинок/г тканини, та в печінці — 4,6 частинок/г. Основними типами ідентифікованого полімеру є поліетилен, поліетилентерефталат, поліпропілен, полістирол, полівінілхлорид та полікарбонат [9]. Результати експериментальних досліджень демонструють, що мікропластик здатен індукувати запальні реакції в кишечнику та порушення функціональної активності печінки, зокрема метаболічних процесів. Однак наразі відсутні достатні докази того, чи ці зміни можуть бути пусковим механізмом розвитку тяжких патологій [2].

Серцево-судинна система. Згідно з клінічними спостереженнями, опублікованими у New England Journal of Medicine, наявність мікропластику в організмі асоціюється з підвищеним ризиком серцево-судинних захворювань. Було виявлено, що у пацієнтів із серцевою патологією присутність мікропластикових частинок подвоює ймовірність виникнення інфаркту міокарда або інсульту порівняно з особами, у яких частинки не виявлено [10].

Дихальна система. Інгаляційний шлях є одним із ключових шляхів потрапляння мікропластику в організм. Мешканці урбанізованих територій щорічно вдихають до 121 000 мікропластикових частинок, у тому числі переважно поліетилену, поліетилентерефталату та полістиролу [6]. Найдрібніші частинки <10 мкм, здатні проникати до альвеолярних структур легень, спричиняють оксидативний стрес, локальне запалення та порушення газообміну. Ці процеси маніфестують клінічно у вигляді кашлю, чхання, задишки, а також системних симптомів, таких як втома, головний біль і гіпоксія внаслідок зниження насичення крові киснем [8].

Репродуктивна система. Мікропластик відіграє суттєву роль у виникненні безпліддя. Водночас вплив мікро- та нанопластиків на функціонування яєчок, якість сперми, яєчників і жіночих фолікулів досі вивчені недостатньо. Згідно з наявними дослідженнями, мікро- та нанопластикові частинки здатні порушувати процеси овуляції та спричиняти гормональні дисбаланси, зокрема шляхом зміни рівнів естрогену й тестостерону. Потрапляючи до організму, ці частинки можуть чинити негативний вплив на репродуктивну систему, модифікуючи розвиток як статевих, так і соматичних клітин, залежно від їхніх морфометричних характеристик — розміру, форми та хімічної природи [11].

Мікропластикові частинки здатні проникати в системний кровообіг і транспортуватися до різних органів, включаючи плаценту. Дослідження засвідчують, що як самі частинки, так і супутні хімічні добавки можуть перетинати плацентарний бар'єр, потрапляючи до організму плода та навколоплідних вод. Дані експериментів на тваринах і культур клітин *in vitro* свідчать про потенційну токсичність мікропластику для плода і плаценти. Зокрема, встановлено, що вплив мікропластикових частинок на материнський організм під час вагітності та лактації асоціюється зі змінами морфології мозкової тканини і складу нейрональних клітин у потомства. Вплив у критичні періоди розвитку — внутрішньоутробний та ранній постнатальний — може спричиняти незворотні порушення формування репродуктивної осі й функціонування центральної нервової системи у нащадків різних біологічних видів [11].

Імунна відповідь. Мікропластик може викликати імунну відповідь в організмі. Процес їх нейтралізації здійснюється за участю тканинних бар'єрів, рецепторів розпізнавання патернів

та механізмів фагоцитозу. Через мікроскопічний розмір та високу стійкість до біодеградації, мікропластик може накопичуватися всередині імунних клітин, що призводить до порушення їх функціональної активності. Взаємодія мікропластику з мікробіотою організму здатна стимулювати активацію вродженого імунітету та провокувати хронічні запальні процеси. Такі тривалі запалення потенційно сприяють розвитку злоякісних новоутворень через активацію прозапальних сигнальних шляхів, індукцію секреції цитокінів та модифікацію імунної відповіді [12].

Стратегії зменшення впливу мікропластику. Відповідно до аналітичного звіту, опублікованого National Public Radio, одним із пріоритетних підходів до зменшення негативного впливу мікропластику є посилення контролю за джерелами його викидів у довкілля. Особливої уваги заслуговують заходи, спрямовані на скорочення використання одноразових пластикових виробів, а також впровадження більш жорстких екологічних регуляторних норм. Значну роль у мінімізації мікропластикових частинок відіграють сучасні методи очищення питної води, зокрема нанофільтрація та зворотний осмос. Ці технології продемонстрували високу ефективність у видаленні частинок навіть нанорозмірного діапазону. Проте, як зазначають автори, подальші фундаментальні дослідження залишаються необхідними для формування комплексних медичних і екологічних стратегій протидії мікропластику [13].

Схожі висновки представлені в оглядовій статті, опублікованій у журналі Water Science & Technology (2020), де детально проаналізовано існуючі методи очищення води від мікропластику. Найвищу ефективність демонструють інтегровані технологічні підходи, що поєднують механічну фільтрацію, коагуляцію, флотацію та біофільтрацію. Утім, автори наголошують на труднощах уніфікації методів ідентифікації та кількісного визначення мікропластикових частинок, що ускладнює проведення якісного моніторингу та встановлення нормативних меж забруднення. У зв'язку з цим підкреслюється необхідність нормативно-правового регулювання та активного інформування громадськості щодо способів зменшення впливу мікропластику на здоров'я людини [14].

Висновки. Проведений огляд літератури свідчить про те, що проблема мікропластикового забруднення набуває глобального масштабу й становить безпосередню загрозу не лише для довкілля, але й для здоров'я людини. Мікропластик потрапляє в організм людини з різних джерел — через питну воду, продукти харчування, повітря — і має потенціал до біоакумуляції в тканинах організму. Виявлення мікропластику в крові, плаценті, грудному молоці, лімфатичних вузлах, а також дослідження на тваринах підтверджують можливу токсичну дію цих частинок: від викликання запальних процесів і оксидативного стресу до гормональних порушень та канцерогенезу.

Особливу тривогу викликає здатність мікропластикових частинок адсорбувати на своїй поверхні токсичні хімічні речовини — важкі метали, пестициди, фталати. Це значно підвищує їхню небезпеку для живих організмів і створює складнощі в оцінці сумарного ризику. Оскільки досі відсутні усталені гігієнічні нормативи щодо вмісту мікропластику у воді чи продуктах, а механізми його дії на людину остаточно не з'ясовані, необхідне розширення наукових досліджень у цьому напрямку.

Пропозиції та рекомендації:

1. Розробити та впровадити національні та міжнародні методики моніторингу мікропластику у воді, продуктах харчування, повітрі, з урахуванням частинок менших за 1 мкм (нанопластик).

2. Здійснювати комплексне дослідження впливу мікро- та нанопластику на органи людини *in vitro* та *in vivo* з використанням сучасних токсикологічних і молекулярно-біологічних методів.

3. Впроваджувати біоіндикаційні системи з використанням живих організмів (ліхени, мікроводорості, молюски) для раннього виявлення мікропластикового забруднення у довкіллі.

4. Стимулювати використання екологічно безпечних матеріалів у харчовій промисловості, медицині та побуті (наприклад, біополімерів замість одноразового пластику).

5. Розробити системи вторинної очистки питної води на рівні домогосподарств (фільтри, мембранні технології), здатні вловлювати частинки пластику розміром менше 5 мкм.

6. Забезпечити екологічну освіту населення щодо джерел мікропластику в повсякденному житті та способів його уникнення.

Таким чином, мікропластик є не лише екологічною, а й міждисциплінарною медико-соціальною проблемою, яка потребує скоординованих зусиль науковців, політиків, промисловості та споживачів. Подальші прикладні дослідження мають бути спрямовані на виявлення критичних точок впливу, розробку механізмів захисту здоров'я та формування науково обґрунтованих норм безпеки.

Література

1. Campen, M.J. Microplastics are Everywhere — We Need to Understand How They Affect Human Health. Nat. Med. 2024, 30(4), 913. https://doi.org/10.1038/s41591-024-02968-x.

2. Brennecke, D.; Ferreira, E.C.; Costa, T.M.; Appel, D.; da Gama, B.A.P.; Lenz, M. Microplastics as a Potential Threat to Food Safety and Human Health: A Review. Nutrients 2023, 15(3), 617. https://doi.org/10.3390/nu15030617.

3. National Institutes of Health (NIH). Plastic Particles in Bottled Water. NIH Research Matters 2024, January 23. Available online: https://www.nih.gov/news-events/nih-research-matters/plastic-particles-bottled-water (accessed on 18 May 2025).

4. European Environment Agency (EEA). Impacts of Microplastics on Health (Signal). European Zero Pollution Dashboards. Available online: https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/**impacts**-of-microplastics-on-health-signal (accessed on 18 May 2025).

5. Galloway, T.S.; Cole, M.; Lewis, C. Interactions of Microplastic Debris throughout the Marine Ecosystem. Nat. Ecol. Evol. 2017, 1, 0116. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116.

6. Microplastics in Food Products: Prevalence, Artificial Intelligence Applications, and Health Risks. Emerg. Contam. 2025, 11, 100477. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2025.100477.

7. Kumar, R.; Manna, C.; Padha, S.; Verma, A.; Sharma, P.; Dhar, A.; Ghosh, A.; Bhattacharya, P. Micro(nano)plastics Pollution and Human Health: How Plastics Can Induce Carcinogenesis to Humans. Chemosphere 2022, 298, 134267. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134267.

8. Li, Y.; Tao, L.; Wang, Q.; Wang, F.; Li, G.; Song, M. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. Environ. Health 2023, 1(4), 249–257. https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052.

9. Environmental Working Group. New Study Links Microplastics to Serious Health Harms in Humans. Environmental Working Group 2024, March. Available online: [URL not provided] (accessed on 18 May 2025).

10. Campanale, C.; Massarelli, C.; Savino, I.; Locaputo, V.; Uricchio, V.F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. Int. J. Environ. Res. Public Health 2023, 20(4), 2965. https://doi.org/10.3390/ijerph20042965.

11. Sharma, R.K.; Kumari, U.; Kumar, S. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 2024, 16(5), e60712. https://doi.org/10.7759/cureus.60712.

12. Cheng, Y.; Yang, Y.; Bai, L.; Cui, J. Microplastics: An Often-Overlooked Issue in the Transition from Chronic Inflammation to Cancer. J. Transl. Med. 2024, 22, 959. https://doi.org/10.1186/s12967-024-05731-5.

13. Woodall, L.C.; et al. Microplastics, Plastic Nanoparticles, and Health Risks: What Science Tells Us. NPR 2024, December 18. Available online: https://www.npr.org/sections/shots-health-news/2024/12/18/nx-s1-5227172/microplastics-plastic-nanoparticles-health-pfas (accessed on 18 May 2025).

14. Sobral, P.; Marques, J.C.; Pereira, M.F.R. Microplastics in Drinking Water: A Macro Issue. Water Sci. Technol. 2020, 22(5), 5650–5665. https://iwaponline.com/ws/article/22/5/5650/88579/Microplastics-in-drinking-water-a-macro-issue.

MICROPLASTICS IN DRINKING WATER AND FOOD: A THREAT TO HUMAN HEALTH

Nataliia BERTOSH
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0002-9646-0652

Abstract

The study addresses the issue of microplastic pollution as one of the emerging threats to human health. Special attention is given to the main pathways through which microplastic and nanoplastic particles enter the human body — via drinking water, food, air, and household sources. The mechanisms of microplastic toxicity affecting various organ systems are described, including the digestive, respiratory, cardiovascular, reproductive, and immune systems. It is shown that microplastics are capable of accumulating toxic substances, disrupting hormonal balance, inducing oxidative stress, and triggering inflammatory responses. The work aims to raise awareness and explore ways to minimize the negative impact of microplastics on human health..

Keywords: microplastic, nanoplastic, drinking water, food, human health, toxicity, environment, pollution.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332144

BIODESTROYERS AS DRIVERS OF EVOLUTION OF SOIL ECOSYSTEMS

Alyona BUNAS, Igor MOVCHAN, Olena SHERSTOBOEVA, Yevhenia TKACH
Institute of Agroecology and Environmental Management,
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
Metrolohichna Str., 12, Kyiv, 03143, Ukraine
e-mail:bio-206316@ukr.net

Abstract

In conditions of intensive farming, post-harvest plant residues, in particular straw, become a significant logistical and environmental challenge. A promising alternative is the use of biological destructors, which provide targeted transformation of plant residues in the soil by stimulating biotic processes. Biodestructors not only accelerate the mineralization of organic matter, but also enrich the soil microbiome with beneficial, metabolically active microorganisms that inhibit the development of phytopathogenic and saprophytic species. The carbon released during the decomposition of straw is integrated into humification processes, stimulating the synthesis of humic and fulvic acids - key components of stable soil organic matter. In field conditions, a study was conducted on the effectiveness of different compositions of destructors (bacterial, fungal and combined bacterial-fungal) when applied to organic corn residues. Soil samples were analyzed according to generally accepted microbiological methods. The assessment of the direction of microbiological processes was carried out using ecological coefficients. The results showed that within 60 and 180 days after the introduction of biodestructors, the values of Km, Kol and Kped in the experimental variants did not exceed 1, which indicates a balanced course of biotic processes and a harmonious ratio of synthetic and destructive mechanisms in the soil. For the control variant, these indicators were at or slightly above unity, which indicates a less stable state of the microbiological environment. The coefficient of transformation of organic matter 60 days after treatment with biodestructors exceeded the control indicators by 2.3–3.2 times, depending on the type of destructor. On the 180th day, the K of the experimental variants was 1.5 times higher than the control. This indicates a prolonged effect of destructors and effective conversion of organic matter throughout the vegetation cycle. Therefore, the formation of a favorable soil microbiome as a result of the use of biodestructors ensures not only the rapid processing of plant residues, but also contributes to the stabilization of physiological and metabolic processes in the soil environment.

Keywords: *destructors, microorganisms, mineralization, transformation of organic matter, ecological coefficients.*

The most significant property of soil, of planetary significance, is the closed biogeochemical cycles of most chemical elements of the Biosphere. In particular, these are the carbon and nitrogen cycles, which creates conditions for the simultaneous course of multidirectional chemical and

microbiological processes [1]. The fundamental driver of the global carbon cycle, participating in the processes of transformation of organic matter, including the degradation of plant residues, the synthesis of humic substances, the release and fixation of CO_2, CH_4 and other greenhouse gases, are soil microorganisms. It is known that 1 g of soil (0-20 cm) contains 10^9-10^{10} prokaryotic cells (bacteria and archaea), 10^4-10^7 protists, about 100 m of fungal hyphae and 10^8-10^9 viruses. These values are converted into a biomass of prokaryotes exceeding 5 t/ha in some soils, with a biomass of fungi in the range from 1 to 15 tons. Soils also contain genetic diversity, with the total genomic diversity of bacterial communities from undisturbed grassland soils being three orders of magnitude greater than that of aquatic communities, with diversity ranging from thousands to millions of different prokaryotic species per gram of soil [2]. Microbiological processes in soils release more than 60 Gt of CO_2 annually, but are also able to retain a significant proportion of carbon through long-term forms of storage. Scientists [3] have shown that the main component of stable soil carbon (SOC) is microbial carbon (MCC). The share of MCC is approximately 50 % of SOC. However, understanding the spatial and temporal dynamics of MCC stocks is limited due to the variability of the microbiome and high sensitivity to weather conditions. A number of studies have shown the critical role that soil microorganisms play not only in the loss of organic carbon through microbial decomposition, but also in the formation and persistence of organic carbon (SOC), which is confirmed by the covariation between microbial biomass, necromass and SOC content. Although there are many ways in which microorganisms affect both the accumulation and loss of soil organic matter, microbial carbon use efficiency (CUE) is an integrative indicator that reflects the balance of these processes [4; 5].

In the agroecosystems of Ukraine, agriculture annually leaves about 50 million tons of straw, post-harvest or organic residues. From 1 hectare of agrocenosis, 5-7 tons of straw remain, corn - 12.5 tons, sunflower - up to 6 tons; in terms of organic matter content, 1 ton of straw is equivalent to 3.5-4 tons of manure. Usually, more than 20-40 % of straw in agroecosystems is not used at all or, at worst, is burned, causing irreversible damage to biota and the soil itself. In Ukrainian black soils, which account for 6.7 % of world reserves, the humus content at the beginning of the 20-th century was from 4 to 6 %, and at the beginning of the 21st century this figure did not exceed 3.2 %. It is known for certain that soil microorganisms are able to accumulate from 5 to 7 t/ha of organic matter in the soil of agroecosystems per year. Studies have shown that plowing straw and organic residues into the soil as an agrotechnical measure for 7-8 years increases the humus content in sod-podzolic soil by 0.24 %, and in southern black soil by 0.2 % [6-8].

Modern biological preparations that contain agronomically useful microorganisms and products of their cultivation help to solve the issue of straw and post-harvest residue conversion. Among biological destructors, according to microorganisms, two groups can be distinguished: bacterial and fungal. In Ukraine, in recent years, the biodestructors Polymix and Micocell have been widely used in farms.

Polymix – is a concentrated microbiological preparation based on spores of bacteria of the genus *Bacillus polymyxa, Bacillus megaterium, Bacillus licheniformis* and *Azotobacter croococcum* and their metabolic products: phytohormones of the auxin, gibberellin and cytokinin series, amino acids, vitamins. Total titer not less than 10^9 CFU/g of the preparation.

Micocell – is a biodestructor (soil probiotic, remediator) of organic residues. A complex microbial-enzyme preparation to accelerate the process of humification and mineralization of plant residues and soil improvement. The biological preparation consists of a complex of strains of micromycetes *Trichoderma harzianum* and bacteria *Bacillus* ssp. (3 strains) and products of their metabolism: cellulolytic enzymes, phytohormones, antibiotics, vitamins.

In accordance with the above, the field experiment determined the direction of biological processes in the soil after applying the bacterial biodestructor Polymix, the fungal Mycocell, and their combination during the destruction of post-harvest corn residues.

Studies on the direction of microbiological processes in the soil with the introduction of destructors based on microorganisms were determined in the conditions of the Southern Forest-Steppe (Vinnytsia region, Ukraine) in a field experiment. It is worth noting that biological preparations-destructors were never used in these experimental areas.

It is worth noting that bio-destructors were never used in these experimental plots. Field experiment options: 1. Control (treatment of organic residues of the agrocenosis with water); 2. Urea-ammonia mixture liquid fertilizer (Urea Ammonium Nitrate UAN, ώ = 26 %); 3. Polymix 1 kg/ha + UAN 26; 4. MicoCell 1 kg/ha + UAN 26; 5. Polymix 0.5 kg/ha + MicoCell 0.5 kg/ha + UAN 26. The area of each experimental plot is 100 m^2, the repetition of each option is 3 plots. Bio-destructors were applied to organic corn residues, the working solution rate was 330 l/ha, after application, disking was carried out to a depth of 8 cm.

Soil samples were taken using conventional microbiological methods 60 (autumn) and 180 days (spring of the following year) after the application of destructors to the agrocenosis. The number of microorganisms of the main ecological-trophic and taxonomic groups was determined in the soil by the method of sowing limiting dilutions of soil suspension on agar nutrient media [9].

The direction of microbiological processes in the soil was determined by ecological coefficients [10]: coefficient of mineralization (K_{min}); coefficient of oligotrophy ($K_{ol.}$); coefficient of pedotrophy (K_{ped}); coefficient of transformation of organic matter (K_{tom}). The results of the experimental studies were statistically analyzed using the Microsoft Excel program package. We determined the mean values (x) and their standard deviations (SD). The level of significance selected for the study was $P < 0.05$.

Microorganism communities participate in the formation of all important soil properties, determine the intensity and direction of soil formation processes, including humus; form the biodynamic balance of the processes of synthesis and decomposition of organic matter and the availability of nutrients for plants. The ratio of numbers between different ecological-trophic groups of soil microorganisms and the composition of the microbiome directly depends on the plant species, its ontogeny, and the interaction between microorganisms and plants. It is believed that up to 50-70 % of the aboveground biomass is removed from the corn agrocenosis, and 30-50 % remains. In addition, in the overall balance of organic residues, roots account for about 10-20 % of the total biomass remaining in the soil of the agrocenosis. According to various data, the amount of the root system is approximately 1.5-2.5 t/ha, depending on the region of cultivation, variety, sowing density, etc.

In the field experiment, post-harvest residues of corn plants (straw, cobs, roots, etc.) were treated with biodestructors. The study of the number of microorganisms of the main ecological-trophic and taxonomic groups of the soil of the corn agrocenosis is presented in Table 1.

Based on microbiological seeding at 60 and 180 days after the application of the biodestructor, it was established that the number of microorganisms of the main ecological-trophic and taxonomic groups in the experimental variants was higher than in the control.

Microbiota study on the 60-th day of the experiment showed an increase in the number of microorganisms of all ecological-trophic and taxonomic groups relative to the control and the variant where nitrogen fertilizer was applied. The use of a complex of destructors contributed to an increase in ammonifiers by 2.2 times compared to the control, with mono-application of destructors the number of this group increased by no more than 2 times. It is worth noting that the number of streptomycetes and micromycetes increased in the experimental variants, which is naturally associated with the process of destruction of organic matter of straw left in the agrocenosis. The

number of the above-mentioned groups increased no more than 2 times compared to the control and 1.5–1.8 times compared to the application of nitrogen fertilizer. Therefore, the use of biological products contributes to the better development of microorganisms and, accordingly, an increase in their number than the mono-application of nitrogen fertilizers.

Table 1. The number of microorganisms of the main ecological-trophic and taxonomic groups of soil when using destructors*

Treatment	**The number of microorganisms of the main ecological-trophic and taxonomic groups**						
	Ammonifying, *10^6 CFU/g soil	**Bacteria that use mineral forms of nitrogen, *10^6 CFU/g of soil**	**Oligonitrophiles, *10^6 CFU/g soil**	**Pedotrophic, *10^6 CFU/g soil**	**Streptomycetes, *10^6 CFU/g soil**	**Micromycetes, *10^3CFU/g soil**	***Azotobacter*, % of clumps**
60 days							
Control	6.3±0.3	5.2±0.4	10.1±0.6	10±0.5	1.6±0.1	18.7±1.5	66
Urea Ammonium Nitrate (UAN)	10.1±0.4	7.5±0.5	11.3±0.7	12.1±0.6	2.03±0.1	20.3±1.6	58
Polymix	12.2±0.5	7.3±0.5	11.5±0.7	10.3±0.5	2.87±0.2	28.6±2.3	100
MicoCell	12.8±0.5	5.9±0.4	120.4±0.7	11.6±0.6	3.45±0.2	36.3±2.9	90
Polymix+MicoCell	13.9±0.6	6.2±0.4	14.5±0.9	11.2±0.6	3.1±0.2	31.4±2.5	100
180 days							
Control	5.9±0.4	7.1±0.5	11.6±0.6	13±0.9	1.98±0.1	12.8±0.8	76
Urea Ammonium Nitrate (UAN)	6.1±0.4	6.9±0.5	11.4±0.6	16.1±1.1	2.42±0.1	16.9±1	70
Polymix	6.9±0.4	6.3±0.4	12±0.6	13.8±1	3.05±0.1	25.7±1.5	100
MicoCell	7.8±0.5	6.9±0.5	12.7±0.6	13.1±0.9	4.61±0.2	31.6±1.9	100
Polymix+MicoCell	7.1±0.4	6.4±0.4	13.3±0.7	14.1±1	3.23±0.1	28.4±1.7	100

***** *The data in the table are the result of our own experimental research*

For 180 days after the use of destructors, in the spring of the following year, the composition and number of microorganisms were determined in the soil before sowing soybeans. It was found that the number of microorganisms of the main ecological-trophic and taxonomic groups did not differ significantly from the results of the study on day 60, in the experimental variants the number of microorganisms was higher than in the control. Depending on the ecological-trophic group, the increase in the number of microorganisms varied from 1.2 to 2.5 times relative to the control. A higher level of the number of streptomycetes and micromycetes was noted when using the fungal destructor.

Thus, the use of destructors for the conversion of organic residues of agrocenosis, based on both bacterial strains and micromycetes, contributed to the activation of soil microbiota. An increase in the number of microorganisms of all major ecological-trophic and taxonomic groups was noted for

all variants of the experiment compared to the control and the use of nitrogen fertilizers. In addition, in the variant where nitrogen fertilizer was applied, only the number of bacteria that use mineral forms of nitrogen increased, and the other studied groups of microorganisms were at the same level as the control variant.

Ecological coefficients ($К_{min}$, $К_{ol.}$, $К_{ped.}$, $К_{tom.}$) will allow us to characterize the functional state of the microbiome, the course of microbiological processes and the provision of microorganisms with trophic resources, and allow us to predict soil-forming processes (Table 2).

Table 2. Direction of microbiological processes in the soil when using destructors*

Treatment	Coefficient			
	Mineralization $К_{min}$	**Oligotrophity $К_{ol}$**	**Pedotrophity $К_{ped}$**	**Transformation of organic matter $К_{tom}$**
60 days				
Control	0.83	0.88	1.01	13.93
Urea Ammonium Nitrate (UAN)	0.74	0.64	0.93	23.7
Polymix	0.6	0.59	1.12	32.59
MicoCell	0.46	0.66	1.07	40.57
Polymix+MicoCell	0.45	0.72	1.29	45.1
180 days				
Control	1.2	0.89	0.89	10.8
Urea Ammonium Nitrate (UAN)	1.13	0.88	0.71	11.5
Polymix	0.91	0.91	0.87	14.46
MicoCell	0.88	0.86	0.97	16.62
polymix+micocell	0.9	0.99	0.94	14.98

***** *The data in the table are the result of our own experimental research*

On the 60-th day of the study, the $K_{ol.}$ and $K_{min.}$ of the soil of the agrocenosis where destructors were used did not exceed 1, regardless of the study variant. $K_{ol.}$ for the experimental variants was 0.6-0.72; $K_{min.}$ ranged from 0.45 to 0.6. The indicators of these coefficients for the control variant were 0.88 and 0.83, respectively. Thus, on the 60-th day of the study, favorable conditions for the existence of microbiocenosis were formed in the agrocenosis, the availability of microorganisms was at a fairly high level, and the processes of synthesis of humus substances in the studied soil of the agrocenosis prevailed. The coefficient of pedotrophicity ($K_{ped.}$) calculated for the soil of the agrocenosis where destructors were used for post-harvest residues was above 1. For the variant with the use of a bacterial destructor $K_{ped.}$ = 1.12, for a fungal one = 1.07, and for the complex bacterial+fungal = 1.29. This indicator for the control variant was 1.01, and for the variant with the use of mineral nitrogen fertilizer = 0.93.

Such values indicate that in the studied variants, decomposition of the introduced organic material is at a high level. And based on Kped. it is well observed that on the 60-th day of using the bacterial destructor, the indicator is higher than in the variant where the fungal one was used. This can be explained by the fact that bacteria occupy ecological niches more quickly because they use simple substances in their trophic pathways, unlike micromycetes, which, to ensure their vital activity, synthesize a complex of complex enzymes that are able to decompose polymers into monomers, and the construction of cell biomass itself is physiologically more complex than in prokaryotes. The

organic matter transformation coefficient was also calculated, which for the experimental variants was 2.3-3.2 times higher, depending on the destructor, compared to the control; and 1.4-1.9 times higher compared to the variant where mineral nitrogen fertilizer was used. So, on the 60-th day of the study of the soil of the agrocenosis where organic corn residues were treated with destructors, favorable conditions were created for the development of microorganisms of all ecological-trophic groups, the microbiocenosis itself was in a homeostatic state, and the process of destruction of organic material took place at a high level, as evidenced by the ecological coefficients.

On the 180-th day of the study, the $K_{min.}$ of the soil of the agrocenosis where destructors were used did not exceed, but approached 1 (Table 2). The soil mineralization coefficient of the control variant and the variant where nitrogen fertilizer was used was 1.2 and 1.13, respectively. It can be concluded that it was in the control soil and when nitrogen fertilizer was used that conditions were created when the microbiocenosis triggers the processes of destruction of soil substances, most likely this is due to the deficiency of organic carbon. That is, the soil microbiocenosis formed in these study options is not capable of decomposing organic corn residues with negligible activity. The oligotrophicity coefficient for all options was close to 1, which indicates the absence of nutrient deficiency. The pedotrophicity coefficient calculated for the soil of the agrocenosis of all studied variants was below 1 ($K_{ped.}$ was fixed within 0.71-0.94), that is, oligotrophic microorganisms that feed on low-molecular substances and indicate the last stages of the succession of microbial communities begin to dominate in the structure of the microbiocenosis. The calculated soil organic matter transformation coefficient on the 180-th day of the study was 2.5-3 times lower than the K_{tor} values for the experimental variants. Such indicators indicate that the transformation of organic matter still occurs in the soil of the agrocenosis, but at a lower level than on the 60-th day of the study. It should be noted that for all experimental variants $K_{tor.}$ ranged from 10.8 – the control variant to 16.6 – the variant with the use of a fungal destructor. Compared with the control variant in the variants where destructors were used $K_{tor.}$ was 1.3-1.5 times higher.

In the field experiment, the direction of microbiological processes in the soil was determined when using destructors on organic corn residues. It was found that during the study period of 60 and 180 days, the microbiocenosis was characterized by an increase in the number of microorganisms of the main ecological-trophic and taxonomic groups. In the soil where destructors were applied, an increase in the number of ammonifiers, streptomycetes, micromycetes and bacteria of the genus *Azotobacter* was recorded. The calculated ecological coefficients prove that the introduction of destructors into the soil on organic corn residues primarily allows the formation of a highly effective microbiome with the dominance of agronomically useful microorganisms. The formed microbiome contributes to the effective conversion of organic corn residues throughout the entire study period and allows balancing the course of all physiological and metabolic processes in the soil, which in turn contributes to the homeostatic state of the soil before sowing the next crop.

References

1. Patyka, N. & Kaminsky, V. (2014). Agrobiology of Rhizosphere. Agricultural Science and Practice. 1 (3), 69-75. https://doi.org/10.15407/agrisp1.03.069

2. Tecon, R. & Or, D. (2017). Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. FEMS Microbiology Reviews. 41 (5), 599-623. https://doi.org/10.1093/femsre/fux039

3. Liang, Y., Hu, H., Crowther, T. W., Jörgensen, R. G., Liang, C., Chen, J. et al. (2024). Global decline in microbial-derived carbon stocks with climate warming and its future projections. Natl Sci Rev., 11. doi: 10.1093/nsr/nwae330

4. Woolf, D. & Lehmann, J. (2019). Microbial models with minimal mineral protection can explain long-term soil organic carbon persistence. Sci. Rep., 9. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43026-8

5. Tao, F., Huang, Y., Hungate, B. et al. (2023). Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. Nature. 618, 981-985.

6. Hadzalo, Ya.M., Vozhehova, R.A. & Likar, Ya.O. (2023). Efficiency of application of microbial preparations of destructors on plant residues in the process of their mineralisation after harvesting. Agrarian innovations. 19, 24-33. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.4

7. Andreyuk E.I. and Valagurova E.V. (1992). Fundamentals of the ecology of soil microorganisms. Kyiv. Ukraine. 224 p.

8. Tokmakova, L. & Trepach, A. (2022). Microbiological destruction of organic matter in agrocenoses. Bulletin of Agricultural Science. 100.(2), 19-26. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202202-03

9. Mason-Jones, K, Robinson, S.L., Veen, G.F.C. & Manzoni, S. (2022). Microbial storage and its implications for soil ecology. ISME J. 16(3), 617-629. doi: 10.1038/s41396-021-01110-w.

10. Volkogon, V.V., Nadkernychna, O.V., Tokmakova, L.M. et al. (2010). Experimental soil microbiology: monograph edited by V.V. Volkogon. Kyiv: Agrarna nauka. 464 p.

11. Demyanyuk O., Shatsman D., & Symochko L. (2020). Structure and Dynamics of Soil Microbial Communities of Natural and Transformed Ecosystems. Journal of Environmental Research. Engineering and Management. 76. (4), 97-105. DOI 10.5755/j01.erem.76.4.23508

БІОДЕСТРУКТОРИ ЯК РУШІЇ ЕВОЛЮЦІЇ ҐРУНТОВИХ ЕКОСИСТЕМ

Альона БУНАС
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https://orcid.org/0000-0003-4806-7004

Ігор МОВЧАН
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https://orcid.org/0009-0002-0647-6133

Олена ШЕРСТОБОЄВА
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https://orcid.org/0000-0001-8239-0847

Євгенія ТКАЧ
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https://orcid.org/0000-0002-0666-1956

Анотація. В умовах інтенсивного землеробства післязбиральні рослинні залишки, зокрема солома, стають значним логістичним та екологічним викликом. Перспективною альтернативою є використання біологічних деструкторів, які забезпечують цілеспрямовану трансформацію рослинних залишків у ґрунті шляхом стимулювання біотичних процесів. Біодеструктори не тільки прискорюють мінералізацію органічної речовини, але й збагачують ґрунтовий мікробіом корисними, метаболічно активними мікроорганізмами, що пригнічують розвиток фітопатогенних та сапрофітних видів. Вуглець, що вивільняється під час розкладання соломи, інтегрується в процеси гуміфікації, стимулюючи синтез гумінових та фульвокислот – ключових компонентів стабільної органічної речовини ґрунту.

У польових умовах було проведено дослідження ефективності різних деструкторів (бактеріальних, грибкових та комбінованих бактеріально-грибкових) при застосуванні на органічних залишків кукурудзи. Зразки ґрунту аналізували за загальноприйнятими мікробіологічними методами. Оцінку спрямованості мікробіологічних процесів проводили за допомогою екологічних коефіцієнтів. Результати показали, що впродовж 60 та 180 днів після внесення біодеструкторів значення Кмін., Кол. та Кпед.у дослідних варіантах не перевищували 1, що свідчить про збалансований перебіг біотичних процесів та гармонійне співвідношення синтетичних та деструктивних механізмів у ґрунті. Для контрольного варіанту ці показники були на рівні або трохи вище одиниці, що свідчить про менш стабільний стан мікробіологічного середовища. Коефіцієнт трансформації органічної речовини через 60 днів після оброблення біодеструкторами перевищував контрольні показники у 2,3–3,2 рази, залежно від виду деструктора. На 180-й день Ктор дослідних варіантів був у 1,5 рази вищим за контрольний. Це свідчить про тривалу дію деструкторів та ефективне перетворення органічної речовини протягом усього вегетаційного циклу. Отже, формування сприятливого ґрунтового мікробіому в результаті застосування біодеструкторів забезпечує не лише швидку переробку рослинних залишків, але й сприяє стабілізації фізіологічних та метаболічних процесів у ґрунтовому середовищі.

Ключові слова: деструктори, мікроорганізми, мінералізація, трансформація органічної речовини, екологічні коефіцієнти.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332143

INTERACTION OF HIGHLY BIOTECHNOLOGICAL STRAINS OF MICROORGANISMS WITH THE ROOT SURFACE OF PLANTS

Volodymyr DVORETSKYI, Alyona BUNAS,
Kyrylo BONDARENKO, Mykhailo DVORETSKYI
Institute of Agroecology and Environmental Management,
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
Metrolohichna Str., 12, Kyiv, 03143, Ukraine
e-mail:bio-206316@ukr.net

Abstract

The soil microbiome of agricultural crops is a fundamental element of agroecosystems, determining the growth, development and stability of plants in the agrocenosis. Interactions between plants and microorganisms are the result of long-term coevolution, which contributed to the formation of stable, mutually beneficial associations. One of the key strategies for stable colonization of plants is the formation of biofilms by microorganisms on the surface of roots.

Biofilms are organized communities of microorganisms immersed in a self-synthesized extracellular matrix. This structure provides microbiomes with protection from negative environmental influences and reactions of the plant's immune system. An in-depth understanding of the processes of biofilm formation allows us to develop new strategies for plant-microorganism interactions to increase plant resistance to abiotic stresses, including drought, salinity, heavy metal pollution, and also contributes to the formation of stable and highly productive agroecosystems.

During the experiment, it was found that the level of formation and maturity of biofilms on the roots of seedlings of different test crops depended to a large extent on their species, while the influence of the studied strains was less pronounced. After 48 hours of exposure, biofilm formation was observed on the roots of all studied plants, although the level of their maturity varied significantly. In particular, the minimum density of biofilms was characteristic of representatives of the Fabaceae family, while the maximum was characteristic of crops of the Poaceae family.

Keywords: *biofilms, adhesion, roots, soil, microbiome, community of microorganisms, consortia.*

All plant-microorganism interactions are not random and are the result of long-term coevolution, often leading to associations in which the host (plant) and its microbiota cooperate in a mutually beneficial manner [1]. Recently, data have been published in the scientific literature indicating cases of extreme dependence of host plants on the microbiome [2, 3] to the complete absence of any interaction with a particular microbiota [4].

However, the first step in establishing an interaction between microorganisms and plants is the adhesion of microorganisms to plant roots. This process involves weak hydrophobic and electrostatic interactions, which can progress to more stable attachment induced by specific environmental signals and the host plant [5]. The next step in this interaction is the expression of genes responsible for the

synthesis of exopolysaccharides with subsequent biofilm formation. The formed biofilms have the appearance of mucous complex-organized membranes around the roots, which provide a long-term and favorable environment not only for the attachment of microorganisms to plants, but also for their existence [6].

Given all of the above, the purpose of our study was to identify the ability to form biofilms on the roots of various agricultural crops by strains of microorganisms that have high biotechnological characteristics and are promising for production.

The study was conducted in the Laboratory of Microorganism Ecology, Department of Agroecology and Biosafety, Institute of Agroecology and Environmental Management of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine). In the laboratory experiment, the adhesive properties of 5 strains of microorganisms (Bacillus subtilis K4, B. subtilis F6, B. subtilis D24, B. subtilis M7, B. subtilis A9) isolated from the rhizosphere of spring wheat in 2024 were determined. The following test plants were used for the experiment: spring wheat Tokata, barley Sebastian, corn Khorol, cucumber Rodnychok F1, sweet pepper Ivanhoe, tomato Sanka, zucchini Eleonora F1, beans Shahinya, chickpeas Triumph, vegetable peas Dragon, seed peas Maecenas, pumpkin West.

The ability to form biofilms on plant surfaces was studied by the express method 48 hours after contact between the seedling and the microorganism. The level of biofilm formation was assessed using the plus system, where 0 - no adhesion of bacterial cells was recorded, (++++) - biofilm of medium or greater thickness, information is specified in Table 1 [7, 8]. 10 seedlings from each study variant were studied; biofilm formation was assessed in 10 fields of view. Data processing was carried out using MS Excel, Statistica 12.0 software.

In laboratory studies, the level of biofilm formation on the roots of test crop seedlings was determined by the action of test microorganisms presented in Table 1.

Table 1. Biofilm formation by strains of microorganisms on seedlings of agricultural crops

№	Option of research	*Bacillus subtilis*				
		A9	**K4**	**M7**	**D24**	**F6**
1	Spring wheat	++++	++++	++++	++++	++++
2	Barley	++++	+	++++	+++	+++
3	Corn	++++	+	++++	++++	++++
4	Beans	+	++	+	+	++
5	Chickpeas	+	++	+	++	++
6	Vegetable peas	+	++	+	++	++
7	Seed peas	+	+	+	++	++
8	Tomato	++++	++++	++	++++	++++
9	Sweet pepper	+++	+++	+	++++	+++
10	Cucumber	++	+++	+	++++	++++
11	Zucchini	+++	+	++	+++	++
12	Pumpkin	++	+	+	++	++

During the research, it was found that the level of formation largely depended on both the species of the test culture and the strain under study. After 48 hours of study, biofilm formation was observed on the roots of all the tested test cultures, but with different levels of formation. The lowest level of biofilm formation was characteristic of test cultures belonging to the legume and cucurbit families. However, the formation of biofilms of medium and greater thickness was observed when the studied strains were used on cereal and solanaceous crops.

In general, the most intensive formation of biofilm structures was observed on seedlings of wheat (Triticum aestivum), corn (Zea mays), barley (Hordeum vulgare) and tomatoes (Solanum

lycopersicum), sweet pepper (Capsicum annuum L.), which indicates a high level of microbial colonization under optimal microbiological conditions and is most likely associated with the activity of primary roots (high secretory capacity) of cereal crops. It was also found that microorganisms exhibit a high ability to attach to the surface of the rhizodermis due to the production of extracellular polysaccharides, which contribute to the formation of biofilms and increase the resistance of the microbial population to adverse conditions. Of particular note are the results on the formation of biofilms on the roots of legumes - peas, field peas, chickpeas and beans. It was found that these test cultures demonstrated a lower density of biofilms, which is most likely due to the fact that the bacterial test strains are not symbiotic nitrogen fixers, but belong to free-living microorganisms.

According to the results of studies of the strains of microorganisms, it was found that all bacterial strains were able to form colonies and biofilms of varying degrees of thickness on the roots of seedlings, which indicates their ability to be introduced into the root zone of plants during the formation of the microbiome.

References

1. Koskella, B. & Bergelson, J. (2020). The study of host-microbiome (co)evolution across levels of selection. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. *375.* https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0604

2. Fisher, R. M., Henry, L. M., Cornwallis, C. K., Kiers, E.T., & West, S. A. (2017). The evolution of host-symbiont dependence. *Nat. Commun* 8. 1-8. DOI: 10.1038/ncomms15973

3. Metcalf, C. J. E., Henry, L. P., Rebolleda-Gómez, M., & Koskella, B. (2019). Why Evolve Reliance on the Microbiome for Timing of Ontogeny. *MBIO*. 10. 5. https://doi.org/10.1128/mbio.01496-19

4. Tobin, J. H., Sanders, J. G., Fierer, N. (2019). Not all animals need a microbiome. *FEMS Microbiology Letters.* 366. 10. https://doi.org/10.1093/femsle/fnz117

5. Schmidt, J. E., Kent, A. D., Brisson, V. L. et al. (2019). Agricultural management and plant selection interactively affect rhizosphere microbial community structure and nitrogen cycling. *Microbiome.* 7. 146 https://doi.org/10.1186/s40168-019-0756-9

6. Chen, S.-J., Hong, X.-Y., Wang, L.-Zh., Wu, H.-M. et al. (2025). Plant exudates-driven microbiome recruitment and assembly facilitates plant health management. *FEMS Microbiology Reviews.* 49. https://doi.org/10.1093/femsre/fuaf008

7. Halkin, M., Limanska, N., Filipova, T., & Ivanytsia, V. (2012). Formuvannia bioplivky bakteriiamy *Lactobacillus plantarum* na koreniakh Roslyn. [Biofilm formation by *Lactobacillus plantarum* bacteria on the roots of *Lepidium sativum* L. plants. *Lepidium sativum* L.] *Mikrobiolohiia i biotekhnolohiia. – Microbiology and Biotechnology.* 3, 34-43. [in Ukrainian].

8. Tverdokhlib, V. S., Limanska, N. V., Krylova, K. D., Ivanytsia, V. O. (2018). Ability of *Lactobacillus plantarum* ONU 12 and *Bacillus megaterium* ONU 484 to stimulate growth of wheat seedlings and to form biofilms. *Мікробіологія і біотехнологія.* 4.: 6-18. DOI: http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2018.4(44).149360

ВЗАЄМОДІЯ ВИСОКОБІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ШТАМІВ МІКРООРГАНІЗМІВ ІЗ КОРЕНЕВОЮ ПОВЕРХНЕЮ РОСЛИН

Володимир ДВОРЕЦЬКИЙ
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https:// orcid.org/0000-0001-8427-7813

Альона БУНАС
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https://orcid.org/0000-0003-4806-7004

Кирило БОНДАРЕНКО
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https://orcid.org/0009-0002-3429-0897

Михайло ДВОРЕЦЬКИЙ
Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
https:// orcid.org/0009-0002-9324-7696

Анотація

Ґрунтовий мікробіом сільськогосподарських культур є фундаментальним елементом агроекосистем, що визначає ріст, розвиток та стабільність рослин в агроценозі. Взаємодії між рослинами та мікроорганізмами є результатом тривалої коеволюції, яка сприяла формуванню стабільних, взаємовигідних асоціацій. Однією з ключових стратегій стабільної колонізації рослин є формування біоплівок мікроорганізмами на поверхні коренів.

Біоплівки – це організовані спільноти мікроорганізмів, занурені в самосинтезований позаклітинний матрикс. Така структура забезпечує мікробіомам захист від негативних впливів навколишнього середовища та реакцій імунної системи рослини. Глибоке розуміння процесів формування біоплівки дозволяє розробляти нові стратегії взаємодії рослин і мікроорганізмів для підвищення стійкості рослин до абіотичних стресів, включаючи посуху, засолення, забруднення важкими металами, а також сприяє формуванню стабільних та високопродуктивних агроекосистем.

Під час експерименту було виявлено, що рівень формування та зрілості біоплівок на коренях розсади різних тестових культур значною мірою залежав від їх виду, тоді як вплив досліджуваних штамів був менш вираженим. Після 48 годин експозиції формування біоплівок спостерігалося на коренях усіх досліджуваних рослин, хоча рівень їхньої зрілості суттєво варіювався. Зокрема, мінімальна щільність біоплівок була характерна для представників родини Fabaceae, тоді як максимальна – для культур родини Poaceae.

Ключові слова: біоплівки, адгезія, корені, ґрунт, мікробіом, угруповання мікроорганізмів, консорції.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330391

МІКРОКЛОНАЛЬНЕ РОЗМНОЖЕННЯ РОСЛИН АРАУКАРІЇ З МЕТОЮ ПОДАЛЬШОГО АНАЛІЗУ ЇХ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

Софія ІВКО[1], Юлія ЛУЧАКІВСЬКА[2]
[1]Київський Палац дітей та юнацтва
вул.Мазепи 13, м. Київ, 01010, Україна
[2]Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України
вул.Акад.Заболотного 148, м. Київ, 03143, Україна
e-mail: ivkosofiya@gmail.com

Анотація

Дана робота спрямована на аналіз фіторемедіаційного потенціалу рослин араукарії, отриманих в умовах invitro. Нами було оптимізовано протокол поверхневої стерилізації експлантів араукарії та мікроклонального розмноження отриманих рослин, проведено їх генетичну Agrobacterium rhizogenezes-опосередковану трансформацію з метою стимуляції коренетворення рослин отриманих рослин та розроблено протокол ефективного укорінення рослин з використанням різних регуляторів росту. За попередніми дослідженнями було виявлено, що рослини араукарії здатні знижувати вміст іонів шестивалентного хрому у живильному середовищі до слідових кількостей.

Ключові слова: *араукарія, мікроклональне розмноження,Agrobacterium rhizogenezes-опосередкована трансформація, фіторемедіаций потенціал, важкі метали.*

Фіторемедіаційні методи мають низку переваг над іншими методами очищення довкілля, оскільки характеризуються невисокою собівартістю та екологічно безпечним застосування з огляду на зниження ризику повторного розповсюдження забрудника іможливістю ремедіації одразу кількох забрудників різних типів. В науковій літературі є повідомлення про значний фіторемедаційний потенціал рослин араукарії зокрема, про їх стійкість до наявності нікелю у ґрунтах, а також про здатність до відновлення хрому [1,2]. Крім того, рослини араукарії характеризуються лікувальними властивостями [3], а також вважаються цінною декоративним видом. В той же час, араукарія – дводомна рослина, тому отримання насіння вкрай утруднене, натомість розмноження рослин в умовах культури *invitro*дозволяє отримати велику кількість генетично однорідного матеріалу, до того ж використання культури *invitro*передбачає роботу з рослинами в стерильних умовах, що дозволяє уникати фунгальних чи бактеріальних заражень рослинного матеріалу.

Метою нашого дослідження було оптимізувати умови стерилізації і введення в культуру рослин араукарії, розробити протоколи їх подальшого укорінення та мікроклонального розмноження, а також проаналізувати здатність отриманих рослин до відновлення іонів хрому (VI) у живильному середовищі та акумулювання іонів нікелю, свинцю, купруму та кадмію.

Запропонований нами протоколпослідовної обробки експлантів (розгалужених ділянок пагонів довжиною приблизно 3-4 см) рослин араукарії 70 % розчином етилового спирту протягом 1 хвилини та 15 % розчином комерційного препарату білизна (2% гіпохлориту натрію) протягом 15 хвилин з подальшим відмиванням експлантів стерильною дистильованою водою протягом 5 хвилин по 4 рази дозволив провести ефективну поверхневу стерилізацію експлантів араукарії з метою подальшого висаджування рослин на живильне середовище. Таким чином, нам вдалося отримати до 75 % життєздатних рослин араукарії в умовах культури *invitro.*

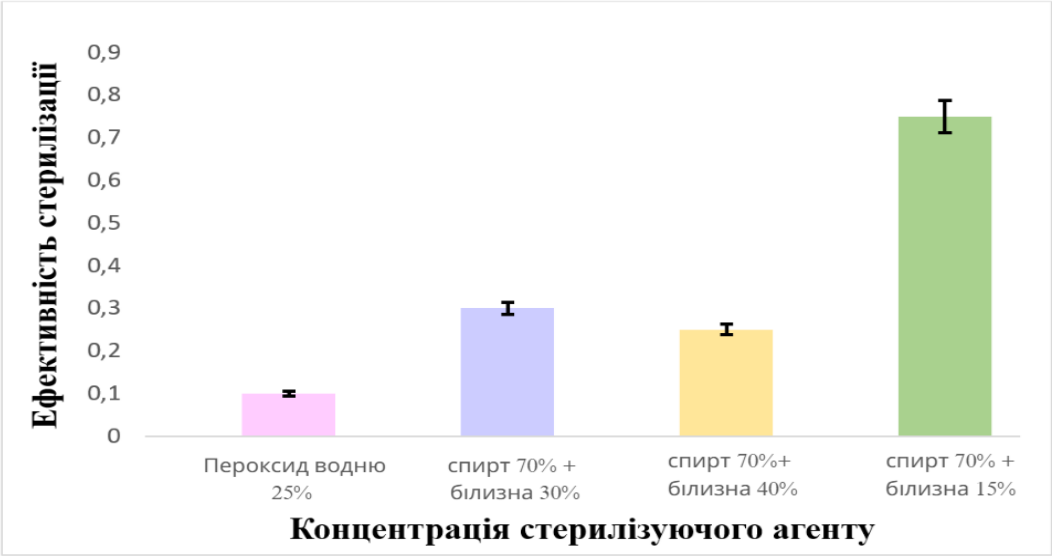


Рис 1. *Ефективність стерилізації експлантів рослин араукарії різними стерилізуючими розчинами*

Культивування рослин араукарії здійснювалося на живильному середовищі MS за температури 20-22°C при 12-годинному освітлені, при цьому інтервал пасажування складав в середньому 2-3 тижні.

Рис 2. *Стерилізовані експланти рослин араукарії в культурі in vitro*

Для стимуляції коренетворення отримані рослини культивували на середовищах з додаванням регуляторів росту: 0,5 мМ та 1,0 мМ нафтилоцтової кислоти (НОК), 2 мМ індолілоцтової кислоти (ІОК), 2,2 мМ 6-бензиламінопурину (БАП), 0,7 мМ, 0,5 мМ; та 1,0 мМ індолилмасляної кислоти (ІМК). Високу частоту укорінення спостерігали за одночасного додавання 0,7 мМ ІОК та 0,7 мМ ІМК до живильного середовища через 5-6 тижнів після введення рослин араукарії в культуру.

Генетичну *Agrobacterium rhizogenezes*-опосередковану трансформацію отриманих рослин араукарії проводили з метою їх подальшого укорінення [4]. Бактеріальну нічну суспензійну культуру *A. rhizogenezes* (штам А4) осаджували шляхом центрифугування протягом 10 хв, 4000 обертів на хвилину. Потім осаджену бактеріальну культуру ресуспендували у рідкому живильному середовищі MS. Отриману бактеріальну культуру культивували на орбітальному шейкері, протягом 30 хв за температури 28 °С з додаванням 100 мМ ацетосирингону. Далі рослинні експланти араукарії інкубували створеною бактеріальною культурою, генетична трансформація проходила протягом 24 годин при розсіяному світлі. В подальшому експланти переносили на живильне середовище MS [4] з додаванням 400 мг/л антибіотику цефотаксиму для елімінації бактерій.

Таблиця 1. Частота укорінення рослини араукарії при застосуванні регуляторів росту

Концентрація фітогормонів у живильному середовищі, мМ	**Тривалість культивування рослин, тижні**	**Частота укорінення експлантів, %**
0,5 НОК + 0,5 ІМК	**5 – 6**	**15**
1,0 НОК + 1,0 ІМК	**5 – 6**	**25**
2 ІОК	**3 – 4**	**5**
2,2 БАП	**3 – 4**	**5**
0,7 НОК + 0,7 ІМК	**5 – 6**	**75**

Наукові публікації [5]свідчать про ефективність застосування *Agrobacterium rhizogenezes*-опосередкованої трансформаціїдля стимуляції коренетворення рослин араукарії, тому вподальшому плануємо оптимізувати наведений протокол, оскільки в наших дослідженнях такий варіант не сприяв укоріненню рослини.

В науковій літературі є повідомлення про значний фіторемедаційний потенціал араукарії рослин – зафіксовані випадки зростання рослин на ґрунтах з підвищеним вмістом нікелю, що може свідчити про їх стійкість до наявності нікелю у ґрунтах, а також є повідомлення про їх здатність до відновлення хрому[1,2]. З метою оцінки здатності рослин араукарії до відновлення шестивалентного хрому отримані рослини культивували у рідкому живильному середовищі MS з додаванням хрому (VI) у концентраціях: 2 ГДК, 6 КДК та 12 ГДК на орбітальному шейкері протягом 5 діб. Обрані концентрації були запропоновані з огляду на опубліковані дані вмісту хрому (VI) у р. Дніпро (від 2 до 12 ГДК) [6]. Вміст хрому (VI) визначали спектрофотометрично з використанням дифенілкарбазиду. Попередні дослідження показали зниження вмісту іонів хрому до слідових кількостей в середовищі, яке містило 2 ГДК, на 3 добу культивування, а також зниження вмісту шестивалентного хрому до слідових кількостей на 4 добу проведення досліду у випадку застосування високих концентрацій хроматів – 6 та 12 ГДК.

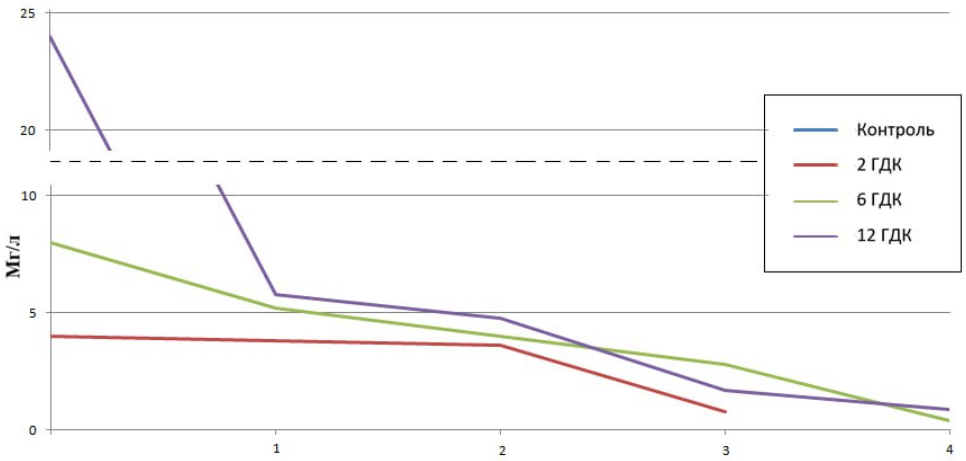


Рис 3. *Динаміка зниження вмісту хрому (VI) у середовищі протягом 4 діб*

З метою оцінки здатності рослин араукарії до акумуляції важких металів свинцю, нікелю, купруму та кадмію рослини культивували на середовищах з додаванням перелічених металів у концентраціях 5-8 ГДК нікелю, 10-15 ГДК свинцю, 3-7 ГДК купруму і 2-5 ГДК кадмію (обрані концентрації підбирали з огляду на аналіз вмісту важких металів у водоймах та ґрунтах України [6]). Через 7 діб культивування рослини відмивали та висушували за температури 28 °С, рослинний матеріал подрібнювали, та визначали концентрації кислоторозчинних (після вилучення 1,0 н HCl, 0,1 н H_2SO_4) та рухомих (після вилучення ацетатно-амонійним буферним розчином pH 4,8) форм важких металів методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії для оцінки фіторемедіаційного потенціалу рослини араукарії.

Література

1. Barbosa JZ, Constantino V, Zanette F etal (2017) Soil fertility affects elemental distribution in needles of the conifer Araucariaan gustifolia: a microanalytical study. // CERNE 23:257–266. https://doi.org/10.1590/010477602017230231 3
2. Bertolotti G, Gialanella S (2014) Review: use of conifer needles as passive samplers of inorganic pollutants in air quality monitoring. // Anal.Methods 6:6208–6222. https://doi.org/10.1039/c4ay00172a
3. Kulshrestha R., Ramasamy S. (2024) Phytochemical and pharmacologicalaspects of Araucaria heterophylla. // Bulletin of Environment, Pharmacology and LifeSciences 13(2): 49–54.
4. Murashige T., Skoog F. (1962) A revised medium for rapid growth and bioassays tissue cultures // Physiol. Pl. –. – №15. – P. 473–497.
5. Gutierrez-Valdes N et al. (2020) Hairy Root Cultures—A Versatile Tool With Multiple Applications. // Front. Plant Sci. 11:33. doi: 10.3389/fpls.2020.00033
6. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 721 Про затвердження гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення від 02.05.2022 https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text

MICROCLONAL REPRODUCTION OF ARAUCARIA PLANTS FOR THE ANALYSIS OF THEIR PHYTOREMEDIATION POTENTIAL

Sofiia IVKO
Kyiv Palace of Children and Youth
Mazepa st., 13, Kyiv, 01010, Ukraine
https://orcid.org/0009-0002-1117-5917

Yuliya LUCHAKIVSKA
Institute of Cell biology and genetic Engineering NAS of Ukraine
Acad.Zabolotnogo st., Kyiv, 03143, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-3294-2954

Abstract

This work is devoted to the analysing of phytoremediation potential of araucaria in vitro plants. We have optimized the protocol of sterilization of araucaria explants and micropropagation of the obtained plants, we've also carried out their genetic Agrobacterium rhizogenezes-mediated transformation in order to stimulate root formation of the obtained plants and developed a protocol for effective rooting of plants using various growth regulators. Our preliminary studies have shown the araucaria plants to be able to reduce the concentration of Cr VI ions to their trace amounts in the culture media.

Keywords: araucaria, microclonal reproduction, Agrobacterium rhizogenezes-mediated transformation, phytoremediation potential, heavy metals.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330760

МАКРОКОМПОНЕНТНИЙ СКЛАД РІЧКОВИХ ВОД ЗАПОВІДНИХ ЗОН ЯК ЕКОЛОГІЧНИЙ ІНДИКАТОР (НА ПРИКЛАДІ КАРПАТСЬКОГО БІОСФЕРНОГО ЗАПОВІДНИКА)

Наталія КРЮЧЕНКО[1], Едуард ЖОВИНСЬКИЙ[1], Петро ПАПАРИГА[2]
[1]Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка
Національної академії наук України
проспект Палладіна, 34, м. Київ-142, 03142, Україна
[2] Карпатський біосферний заповідник
Міністерства охорони навколишнього середовища та природних ресурсів України
вул. Красне Плесо, 77, м. Рахів, 90600, Україна
e-mail: nataliya.kryuchenko@gmail.com

Анотація

У роботі дана характеристика макрокомпонентного (сольового) складу основних річок Угольсько-Широколужанського масиву Карпатського біосферного заповідника – річки Велика Уголька, Мала Уголька, Лужанка та їхні притоки. В результаті моніторингових досліджень встановлено фоновий вміст SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Na^++K^+, мінералізації та pH. Розглянуто дві групи факторів: прямі фактори, що безпосередньо впливають на воду – склад гірських порід та атмосферних опадів (снігу) та непрямі – клімат, рельєф. Показано, що річки не схильні до антропогенного впливу і їх сольовий склад може бути використано в якості еталонних значень (екологічний індикатор), оцінюючи забруднення екосистем регіону.

Ключові слова: *макрокомпонентний (сольовий) склад, води річок, фоновий вміст, екологічний індикатор, Карпатський біосферний заповідник.*

Екологічні показники формуються на основі інформації про екосистему, що відображає її стан та вплив на неї господарської та іншої діяльності людини.

Ми розглядаємо показники стану, що ілюструють якість навколишнього середовища, у нашому випадку – макрокомпонентний (сольовий) склад вод річок Угольсько-Широколужанського масиву Карпатського біосферного заповідника (КБЗ).

Актуальність обраної теми дослідження є важливою в спектрі постійно зростаючого антропогенного навантаження на навколишнє середовище та необхідності визначення фонового вмісту хімічних елементів у природних водах для моніторингових досліджень у регіоні.

Наукова новизна полягає у визначенні не лише фонового макрокомпонентного складу вод річок Угольсько-Широколужанського масиву КБР, але й ключових параметрів, що визначають їх формування.

Метою дослідження було виявлення особливостей формування макрокомпонентного складу (SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Na^++K^+, мінералізація та pH) основних річок Угольсько-

Широколужанського заповідного масиву КБЗ (Велика Уголька, Мала Уголька, Лужанка та їх приток) та його впливу на здоров'я населення.

Методи дослідження. Макрокомпонентний склад води річок виконано за допомогою стандартих методик [1].

Суть дослідження. Сольовий склад є базовим показником для характеристики умов функціонування водних екосистем. Для виявлення формування хімічного складу вод нами виокремлено дві групи факторів: прямі, що безпосередньо впливають на хімічні властивості води – склад гірських порід та атмосферних опадів (снігу) та непрямі – клімат, рельєф. Вплив господарської діяльності людини не розглядався, тому що територія досліджень знаходиться у заповідній зоні, де сконцентрована найбільша за площею у Європі ділянка букових пралісів та заборонена будь яка діяльність, окрім науково-дослідної. Але територія може піддаватися деякому техногенному впливу шляхом транскордонних перенесень забруднюючих речовин повітряними течіями.

Угольсько-Широколужанський масив розташований у межах Тячівського району Закарпатської області, на південних схилах гори Менчул (1501 м) та південних і південно-західних схилах полонини Красна (1568 м) на висоті 400–1600 м над рівнем моря, загальна площа масиву – 15580 га [2]. Свій початок основні ріки (Велика і Мала Угольки, Лужанка) беруть на горі Менчул та полонині Красна. Основними водотоками Угольсько-Широколужанського масиву є річки Велика та Мала Уголька та р. Лужанка.

Проби води відібрано на 6 ділянках: р. Мала Уголька – 70–80 м до злиття з потіком Вежанський; р. Велика Уголька – 50–60 м до злиття з потіком Кам'янський; р. Лужанка – 50–70 м до злиття з потіком Воняча Зворина. Необхідно зазначити, що з місця витоку річок до місць взяття проб немає населених пунктів, тобто прямий антропогенний вплив відсутній.

Річка Велика Уголька має довжину 27 км, ширину – 20–70 м [3], похил – 42 м/км; р. Мала Уголька є правою притокою р.Велика Уголька, довжина – 21,1 км, похил – 48 м/км; р.Лужанка довжиною 34 км, шириною – від 10 до 200–400 м, похил – 31 м/км. Живлення річок мішане, з переважанням дощового. Гірські річки течуть з великою швидкістю, їх алювій представлений валунами та галькою з карпатського флішу.

Нами визначено максимальні, мінімальні та медіанні (фонові) значення макрокомпонентного складу вод (табл. 1).

Іон HCO_3^- – основний компонент сольового складу вод, його джерелом є вапняки і доломіти. Кальцій переважає серед катіонів, його іони утворюють важкорозчинні сполуки – карбонати, які випадають в осад. У воді кальцій діє як відновник, утворюючи гідроксид кальцію $Ca(OH)_2$. Основним джерелом надходження кальцію – вимивання з вапняків і доломіту [2]. При надходженні снігових і дощових вод з низьким вмістом кальцію його концентрація у воді падає і складає 16–19 мг/дм^3, тоді як при відсутності опадів становить 40–50 мг/дм^3.

Магній надходить у воду при вивітрюванні доломіту; сульфати – при вивітрюванні гірських порід і окисленні сульфідів, вони утворюють малорозчинні сульфати кальцію ($CaSO_4$), які осідають на дно річок. Основним джерелом натрію в природних водах є поклади солі NaCl, що утворилися на місці древніх морів. Калій зустрічається у водах рідше, так як він краще поглинається грунтом і витягується рослинами.

Іонний склад досліджуваних вод знаходиться у межах, мг/дм^3: HCO_3^- 50,8–177, Ca^{2+} 16,4–42,1, Mg^{2+} 0,5–11, SO_4^{2-} 6,8–23, Na^++K^+ 0,3–11,8, Cl^- 1,6–10,1, мінералізація 77,5–265; pH – 6,2–9,12. Аналізуючи макрокомпонентний склад річок можна виявити особливості – схожість (по сольовому складу, pH, мінералізації) р.р. Велика і Мала Уголька і відмінність р.Лужанка. Головною різницею хімічного складу р. Лужанка є малий вміст хлоридів, магнію, кальцію,

гідрокарбонатів та мала мінералізація, при підвищеному вмісті натрію і калію; значення pH становить 7,04, тоді як у інших ріках – 7,1–7,5.

Табл. 1. Статистичний аналіз розподілу показників макрокомпонентного складу вод основних річок Угольсько-Широколужанського масиву КБЗ

Показники	р.Велика Уголька			р. Мала Уголька			р. Лужанка		
	med	max	min	med	max	min	med	max	min
pH	7,14	8,06	6,42	7,5	9,12	6,5	7,02	7,7	6,2
Ca^{2+}, мг/дм^3	30,3	42,0	17,0	33,6	51,1	16,4	25,8	42,1	18,6
Mg^{2+}, мг/дм^3	4,1	11,0	1,2	4,2	10,0	0,5	3,5	9,7	2,1
Na^{+}+K, мг/дм^3	5,1	10,0	1,0	5,0	13,0	0,3	6,7	11,8	4,0
HCO_3^{-}, мг/дм^3	107,3	177,0	50,8	113,6	179,6	57,1	90,1	164,9	63,4
$Cl,^{-}$, мг/дм^3	3,1	10,1	1,6	2,7	7,9	1,6	2,2	7,9	1,8
SO_4^{2-}, мг/дм^3	10,5	23,0	6,8	12,6	20,1	4,1	12,7	21,5	8,6
Загальна мінералізація, мг/дм^3	160,5	265,0	77,5	179,4	264,0	87,9	142,0	258,0	100,0

За результатами багаторічних досліджень виявлено, що мінералізація вод залежить від сезону року. У пік весняної повені (березень-квітень) мінералізація води знижується внаслідок надходження снігових вод і становить 91–126 мг/дм^3 (р.Лужанка) і 141–170 мг/дм^3 (р.р. Велика і Мала Уголька). У травні-червні вміст солей підвищується і становить 170–220 мг/дм^3 (р.р. Велика і Мала Уголька) і 130–175 мг/дм^3 (р.Лужанка). Найменші значення мінералізації спостерігаються також в теплий період року під час дощів, коли відбувається розведення річкової води [3]. Для визначення джерел постачання макрокомпонентів, проаналізовано природні фактори формування хімічного складу вод, одним з яких є склад гірських порід.

Для території річок басейну Велика та Мала Уголька характерна наявність великих блоків вапняку з добре розвинутими карстовими утвореннями. Русла гірських річок переважно складені валунами, галькою. Тобто, алювій річищ має різну основу: р.Лужанка – це фліш з переважанням пісковику; р.р. Велика і Мала Уголька – це фліш з переважанням вапняку. Для порівняння вмісту Ca, Mg, K, Na, S у осадових породах (глинисті, карбонатних, пісковиках) побудовано діаграму (рис. 1).

З діаграми можна помітити, що K, Na переважають у глинистих породах і пісковиках, тоді як Ca, Mg – у карбонатних породах. Щодо Cl – його вміст у пісковиках становить 0,001 мг/кг, тоді як у карбонатних та глинистих породах 0,015-0,018 мг/кг. Глинисті мінерали, переважно, гідрослюдистого типу з домішкою частинок кварцу, слюди, польового шпату. Породоутворюючими мінералами пісковиків є кварц, польові шпати, слюда, карбонатних порід – кальцит, доломіт (переважно).

Відомо, що мінімальна швидкість розчинення вапняку становить 1,8–5 мм/рік. У природних умовах гідрокарбонат кальцію утворюється при взаємодії розчиненого в природній воді вуглекислого газу з вапняками: $CaCO_3+H_2O+CO_2=Ca(HCO_3)_2$. Завдяки цій реакції і розчинності гідрокарбонату у воді відбувається постійне переміщення карбонатів у природі. Просочуючись крізь ґрунт і шари вапняку, природні води, які завжди містять у собі розчинний вуглекислий газ, розчиняють карбонати кальцію і виносять його у вигляді гідрокарбонату в річки. Незважаючи на невелику швидкість процесу, хімічна абразія призводить до насичення вод карбонатами. Крім того, розчинність карбонатів активно відбувається при pH більше 8,3

[2]. З огляду на те, шо у водах р.Мала Уголька показник pH знаходиться в межах 7,5–9,17 відбувається насичення вод іонами HCO_3^-.

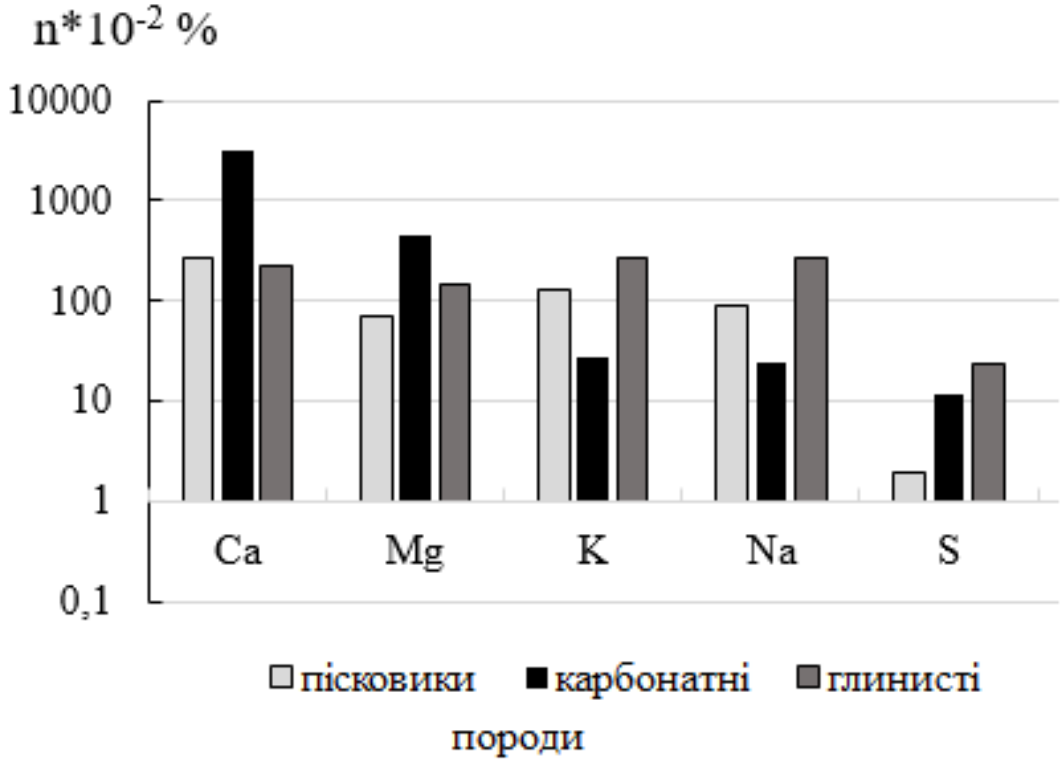


Рис. 1. *Діаграма вмісту Ca, Mg, K, Na, S у осадових породах*

Склад атмосферних опадів теж є прямим фактором формування хімічного складу річкових вод. Найактивніше це відчутно період танення снігового покриву гірських вершин.

Нами відібрано проби снігу та проаналізовано їхній хімічний склад [4]. Снігові води є гідрокарбонатно-натрієвими. Домінуюча роль належить гідрокарбонатам, значення pH 5,2–5,4. Статистична обробка проб дозволила встановити подібність макрокомпонентного складу проб снігу гірських вершин досліджуваного регіону (мг/дм^3): $\mathbf{HCO_3^-}$ 10–15; $\mathbf{Ca^{2+}}$ 0,8–1,5; $\mathbf{Na^+}$+$\mathbf{K^+}$ 3–5,7; $\mathbf{SO_4^{2-}}$ 0,6–1,3; $\mathbf{Cl^-}$ 1,5–2,5. Фоновий вміст макрокомпонентів в пробах снігу представлений на рисунку (рис. 2).

Мінералізація снігових вод – 20–25 мг/дм^3, нижче від показника мінералізації річкових вод – 77–265 мг/дм^3. Мінеральні солі, що містяться в атмосферних опадах, в тій чи іншій мірі впливають на формування хімічного складу поверхневих вод. Іони хлору, що надходять з атмосфери, значно збагачують річкові води (вміст у снігу – 1,8–2,5 мг/дм^3, при середньому в річках – 2,2–3,2 мг/дм^3).

Також нами було розглянуто непрямі фактори формування складу вод, такі як клімат та рельєф. Спостереження за хімічним складом води в залежності від температури проводилося у лютому та травні. Було обрано потік Воняча Зворина, на який практично немає антропогенного тиску. В лютому температура повітря становить – 6^{0}C, температура води – +1^{0}C, тоді як у травні температура повітря – +15^{0}C, а води –+10^{0}C. При жаркому кліматі випаровування збільшує концентрацію солей у воді, а в холодному – вода може містити менше розчинених речовин.

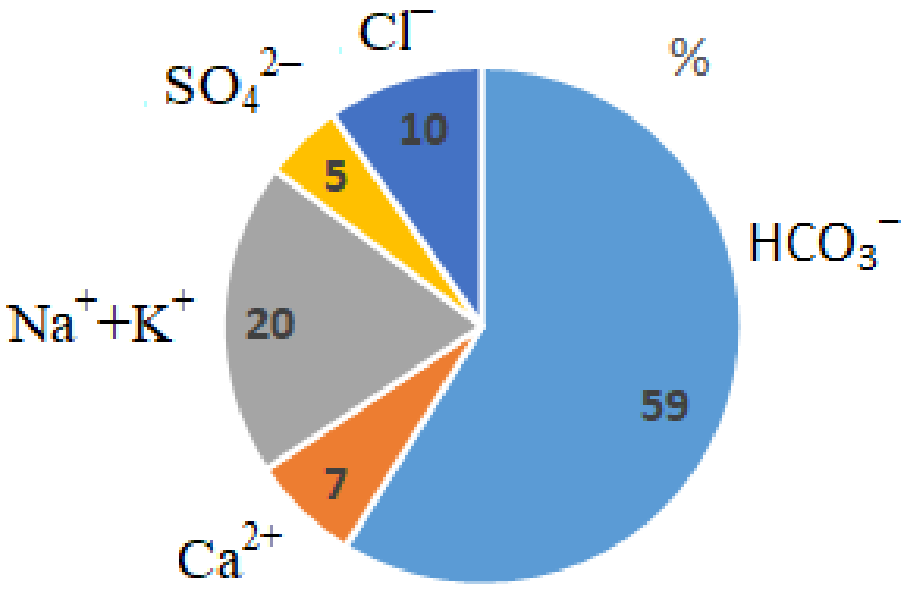


Рис. 2. *Діаграма середнього вмісту макрокомпонентів у сніговому покриві гірських вершин – г. Менчул та полонина Красна (березень–квітень 2012–2021 рр.)*

Аналізуя значення pH вод помічено, що у лютому воно становило 7,34, тоді як у травні – 6,72. Підвищення кислотності pH вод у травні відбувається за рахунок розчинення фульвокислот. У лютому між льодом і промерзаючим розчином відбувається перерозподіл солей. Одночасно з кристалізацією льоду виділяються важкорозчинні сполуки, а в розчинах зберігаються найбільш легкорозчинні. Мінералізація у лютому становить 45,7 мг/дм^3, тоді як у травні – 90,2 мг/дм^3. Вміст хлору у водах однаковий – 2,7 мг/дм^3. У травні (порівняно з лютим) у водах у два рази збільшується вміст магнію, кальцію і гідрокарбонатів, шо пов'язано з хімічним та фізичним вивітрюванням.

Щодо рельєфу, то він впливає на умови водообміну, а від останніх залежить мінералізація і хімічний склад вод [5]. Наприклад, похил річки Мала Уголька – 48м/км, Велика Уголька – 42 м/км, тоді як р.Лужанка – 31 м/км. Мінералізація перших двох річок становить 160–180 мг/дм^3, тоді як р.Лужанка – 142 мг/дм^3. Високі гори та круті схили посилюють ерозію гірських порід, що призводить до збільшення кількості розчинених речовин у річках.

Висновки. Оцінка екологічного стану річок Угольсько-Широколужанського масиву р. Велика Уголька, р. Мала Уголька, р. Лужанка) Карпатського біосферного заповідника показала, що річки не зазнають антропогенного впливу. На хімічний склад річок впливають прямі та непрямі фактори. Прямими факторами, що безпосередньо впливають на воду, є склад гірських порід та опадів (сніг), а непрямими – клімат, рельєф. При розчиненні карбонатів (річки Велика та Мала Уголька) вода насичується іонами HCO_3^-, за наявності флішу з переважанням пісковика (річка Лужанка) вода насичується Na^+.

Одним з показників сталого розвитку є Міжнародний індекс щастя (Happy Planet Index). Цей показник розроблено Фондом нової економіки (NEF), і одним з параметрів є «екологічний слід» – який визначає ступінь впливу людини на навколишнє середовище. Завдяки моніторинговим дослідженням складу річкових вод на природоохоронних територіях можна встановити фонові значення та використовувати їх як референтні значення при оцінці забруднення екосистем регіону.

Література

1. Хільчевський В. К.,Забокрицька М. Р. Хімічний аналіз та оцінка якості природних вод: навч. посібник. Луцьк: Вежа-Друк, **2021**, 76 с.
2. Крюченко, Н.; Жовинський, Е.; Папарига, П. Геохімія об'єктів навколишнього середовища територій пралісів Українських Карпат (Всесвітня природна спадщина ЮНЕСКО) - Київ: Інтерсервіс, **2023**, 131. (ISBN 978-617-8067-19-9)
3. Карпатський біосферний заповідник [Електронний ресурс]. URL: http://cbr.nature.org.ua/ukrainian.htm (дата подання заявки: 10.05.**2025**).
4. Крюченко, Н.; Жовинський, Е.; Папарига, П. Оцінка мікрокомпонентного забруднення снігового покриву гірських вершин Українських Карпат. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія».* **2021**, 54, 278—288. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-21
5. Крюченко, Н.; Жовинський, Е.; Папарига, П. Еколого-геохімічні особливості вод основних річок Угольсько-Широколужанського масиву Карпатського біосферного заповідника. *Мінералогічний журнал*. **2022,** 44, 1, 56—70. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.01.056

MACROCOMPONENT COMPOSITION OF RIVER WATERS OF PROTECTED AREAS AS AN ENVIRONMENTAL INDICATOR (ON THE EXAMPLE OF THE CARPATHIAN BIOSPHERE RESERVE)

Nataliya KRYUCHENKO
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine
Acad. Palladina Ave. 34, 03142, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-8774-9089

Eduard ZHOVYNSKY
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine
Acad. Palladina Ave. 34, 03142, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1601-5998

Petro PAPARYGA
Carpathian Biosphere Reserve
Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine
st. Krasne Pleso, 77, 90600, Rakhiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4021-0809

Abstract

The paper characterizes the macrocomponent (salt) composition of the main rivers of the Uholsko-Shyrokoluzhansky massif of the Carpathian Biosphere Reserve - the Velyka Uholka, Mala Uholka, Luzhanka rivers and their tributaries. As a result of the monitoring studies, the background content of SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Na^++K^+, mineralization, and pH was determined. Two groups of factors are considered: direct factors that directly affect water, such as the composition of rocks and precipitation (snow), and indirect factors, such as climate and relief. It is shown that rivers are not subject to anthropogenic influence and their salt composition can be used as a reference value (environmental indicator) to assess the pollution of ecosystems in the region.

Key words: macrocomponent (salt) composition, river waters, background content, environmental indicator, Carpathian Biosphere Reserve.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332183

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ У БІОГЕОЦЕНОЗАХ ПРИРОДНИХ ТА УРБАНІЗОВАНИХ ЛАНДШАФТІВ ЛІСОСТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

Ірина КУРАЄВА[1], Тетяна КОШЛЯКОВА[1], Анастасія СПЛОДИТЕЛЬ[1], Олена ДЕРЮГІНА[1], Олександр АЗІМОВ[2], Людмила ЛЕМЕШ[1]
[1]*Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України*
пр. Акад. Палладіна, 34, Київ-142, 03142, Україна
[2]*Інститут геологічних наук НАН України*
вул. Олеся Гончара, 55Б, м. Київ, 01054, Україна
e-mail: derugina.eln@gmail.com

Анотація

Вивчено закономірності розподілу мікроелементів в біокосних системах(ґрунти, природні води)природних та урбанізованих ландшафтах лісостепової зони України. Отримано дані щодо валовоговмісту важких металів у ґрунтах умовно чистих територій Київською, Черкаської та Полтавської областей, а також урбанізованих ландшафтів м. Бровари та Київського полігону №5. У ґрунтах м. Бровари та полігону № 5 вміст важких металів значно перевищує фонові показники. Авторами проведені дослідження щодо мікроелементного складу питних підземних вод на території Коростишівського району Житомирської області. Виявлено недостатню кількість Li, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd та Pb. У подальшому необхідно проводити моніторингові спостереження за змінами хімічного складу підземних вод Коростишівського району Житомирської області.

Ключові слова: *мікроелементи, умовно чисті території, урбанізовані території, рухомі форми, міграція, підземні води.*

Забруднення навколишнього середовища важкими металами є серйозною проблемою, яка призводить до негативних наслідків екосистем та являється найважливішою для екологічної геохімії. Дослідження продемонстрували [1], що під час російсько-української війни ґрунтовий покрив, природні води зазнають потужного впливу, а наслідки воєнних дій можуть проявлятись впродовж тривалого часу. Роботу підготовлено на основі попередньо опублікованих результатів, із врахуванням нових даних та аналітичних досліджень. Новизна поданої роботи полягає в розробці комплексної еколого-геохімічної оцінки біогеоценозів природних та урбанізованих ландшафтів лісостепової зони України. Дані о закономірностях розподілу мікроелементів в компонентах навколишнього природного середовища дозволять вирішити наступні народно-господарчі задачі: вирощування екологічно-чистої продукції, розробка нових методів очистки урбанізованих територій для комфортного проживання населення.

Метою дослідження є виявлення особливостей розподілу мікроелементів в ґрунтах, природних водах фонових та урбанізованих територій лісостепу. Авторами досліджувались ґрунти, підземні води умовно чистих (Київська обл., с. Пуща-Водиця; Черкаська обл. с. Головятине; Полтавська обл., м. Миргород; Коростишівський р-н Житомирської обл.) та урбанізованих (Київська обл., м. Бровари, полігон № 5) територій лісостепової зони України.

Пробовідбір ґрунтів та води було здійснено за період 2018—2022 рр. За Методикою ґрунтово-геохімічного обстеження передбачався відбір проб ґрунту на глибині 0—20 см методом конверта, а також за профілем ґрунту, згідно з чинними ДСТУ 4287:2004 та ДСТУ ISO 10381-2:2004. Вимірювання вмісту важких металів у зразках ґрунтів і природних вод виконано за допомогою методу масспектрометрії з індукційно-зв'язаною (*ICP-MS*) плазмою на аналізаторі *Element*-2 (Німеччина) в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення (ІГМР) ім. М.П. Семененка НАН України. Форми міграції мікроелементів у природних водах визначались за допомогою методів математичного моделювання з використанням спеціалізованих програмних засобів *GEMs* v.3.2 та *Hydra&Medusa* [2].

Авторами досліджувались умовно чисті території лісостепу: Київської, Черкаської та Полтавської областей. Основні типи ґрунтів визначено згідно класифікації ґрунтів *інституту Соколовського м. Харків*[3]. Для оцінки вмісту мікроелементів й закономірностей їх розподілу, були вибрані 6 типів ґрунтів: темно-сірі опідзолені середньо-гумусоакумулятивні (Київська обл.), сірі-лісові слабо-гумусоакумулятивні (Київська, Полтавська обл.,), світло-сірі лісові слабо-гумусоакумулятивні (Полтавська обл.), чорноземи типові гумусоакумулятивні (Полтавська обл.) чорноземи опідзолені помірно-слабо-гумусоакумулятивні (Черкаська обл.), чорноземи типові помірно-високо-гумусоакумулятивні (Полтавська обл.). Узагальнена фізико-хімічна характеристика та фоновий вміст мікроелементів досліджених ґрунтів представленої у табл. 1[4].

У результаті аналізу досліджуваних зразків ґрунту «умовно чистих» територій лісостепової зони щодо вмісту фонових значень рухомих форм окремих мікроелементів маємо такі показники — середній вміст рухомих форм важких металів у темно-сірих опідзолених ґрунтах становить, мг/кг: вміст Cu — 1; в типових чорноземах — 2; Co — 3; у світло-сірих опідзолених ґрунтах вміст рухомих форм Cu — 0,5; Zn — 0,14; Co — 1,23[4].

В даній роботі вивчалися урбанізовані ландшафти зони лісостепу (м. Бровари Київська область) та полігону захоронення твердих побутових відходів (ТПВ) № 5. Виявлено особливості розподілу мікроелементів у ґрунтах та підземних водах досліджуваних територій. Територія м. Бровари забруднена елементами I—III класу небезпеки — свинцем, цинком, кобальтом, міддю тощо [5]. Вміст важких металів у ґрунтах Броварів підвищений порівняно з фоновими територіями. В ґрунтах міста спостерігається підвищений валовий вміст важких металів порівняно з фоновими значеннями. Вміст Cu, Pb, Zn підвищено в зонах інженерної інфраструктури й виробничих та комунально-складських об'єктів; Pb, Zn, Co — у зоні інженерної інфраструктури; Pb і Cu — в громадській зоні; Zn, Ni, Pb і Cu — в зоні транспортної інфраструктури. Київський полігон №5, є одним з найбільших в Україні полігонів захоронення ТПВ. В ґрунтовому покриві полігону домінують темно-сірі опідзолені ґрунти переважно на лесових породах, а також чорноземи опідзолені на лесах. У досліджуваних пробах ґрунтових утворень визначені [6,7]рухомі форми знаходження Cu, Zn, Co і Ni; встановлено залежність вмісту рухомих форм від фізико-хімічних властивостей ґрунту. Валовий вміст мікроелементів у досліджуємих зразках значно перевищує фон, також відмічається підвищений вміст рухомих форм металів. У ґрунтах на території полігону відмічається висока концентрація важких металів, пов'язаних з фракцією легкообмінних іонів, а також підвищений вміст водорозчинних форм. У фонових ґрунтах досліджуваної території вміст рухомих форм важких металів зменшується.

Табл. 1. Фізико-хімічна характеристика та валовий вміст мікроелементів у гумусовому горизонті умовно чистих ґрунтів лісостепової зони

Ґрунт	Валовий вміст мікроелементів, мг/кг							Гумус, %	pH водний	Поглиненні катіони, мг-екв/100г ґрунту			
	Co	Mn	Mo	Zn	Cu	Ni	Cr			Ca^{++}	Mg^{++}	Na^{+}	K^{+}
Темно-сірий опідзолений середньо-гумусоакумулятивний, n - 27	18	900	60	21	26	33	100	1,90	7,2	20,42	3,40	0,22	0,74
Сірий-лісовий слабо-гумусоакумулятивний, n - 25	12	700	12	45	12	17	52	2,03	4,5	14,97	4,00	0,20	0,21
Світло-сірий лісовий слабо-гумусоакумулятивний, n - 27	10	800	14	46	11	—	—	0,94	4,8	4,61	2,10	0,27	0,21
Чорнозем типовий гумусоакумулятивний, n - 22	25	320	12	52	20	16	19	4,26	7,4	—	—	—	—
Чорнозем опідзолений помірно-слабо-гумусоакумулятивний, n - 30	16	1100	66	22	37	43	82	3,33	7,1	21,5	4,43	0,26	0,35
Чорнозем типовий помірно-високо-гумусоакумулятивний, n - 27	19	360	12	40	32	12	90	4,67	6,8	—	—	—	—

Примітка: n — кількість відібраних зразків.

Авторами визначено показники мікроелементного складу питної води та вивчено особливості його формування на територіях лісостепу. Протягом 2020 р. авторами було здійснено пробовідбір зразків води із свердловин, розташованих на присадибних ділянках населених пунктів с. Високий Камінь та с. Городське, які розташовані в межах Житомирської області. Глибина свердловин коливалась в межах 10—20 м (с. Високий Камінь).На

попередньому етапі дослідження було визначено загальний хімічний склад досліджуваних вод та виконано порівняльний аналіз. Результати загального хімічного аналізу зразків води представлений у табл. 2[8].

Табл. 2. Загальний хімічний склад зразків води з водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання (с. Високий Камінь, Житомирської обл.)

Найменування показника	**Значення показника**	**ГДК, за ДСТУ 7525:2014***	**ГДК, за ДСанПіН 2.2.4-171-10****	**Клас якості води,за ДСТУ 4808:2007*****
pH	7,22	6,5–8,5	6,5–8,5	2
Жорсткість, мг-екв/дм^3	6,9	7	10	2
Кальцій, мг/дм^3	96,2	130	не визначають	не визначають
Магній, мг/дм^3	25,54	80	не визначають	3
Лужність, мг-екв/дм^3	4,9	6,5	не визначають	2
HCO_3^-, мг/дм^3	289,9	не визначають	не визначають	не визначають
Хлориди, мг/дм^3	39,1	150	350	1
Сульфати, мг/дм^3	24	150	500	1
Залізо загальне, мг/дм^3	0,05	відсутність	1	1
Сухий залишок, г/дм^3	0,304	1	1,5	1
Na + K сумарно, мг/дм^3	9,2	≈92	не визначають	не визначають

*Примітка: загальна кількість зразків — 10; *ДСТУ 7525:2014 Державний стандарт України «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості»; **ДСанПіН 2.2.4-171-10 Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною»; ***ДСТУ 4808:2007 «Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання».*

Підземні води водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання (с. Високий Камінь) за своїм складом є гідрокарбонатними магнієвими кальцієвими. Згідно з вітчизняними нормативними вимогами, перевищень ГДК не зафіксовано. Винятком є лише показник загальної жорсткості, величина якого фактично відповідає величині ГДК, згідно з нормативом ДСТУ 7525:2014 Державний стандарт України «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості». Результати оцінки якості води за блоком загальносанітарних хімічних показників характеризували досліджені підземні води за середніми значеннями блокового індексу ($I_{Псер}$= 1,63, клас 2, підклас 1—2) як перехідні за якістю від «відмінної» дуже чистої до «доброї», чистої. Для підземних вод Житомирської обл., автори проаналізували динаміку змін у часі таких показників загального хімічного складу як загальна мінералізація, іони Ca, Mg, SO_4 та Cl. Період спостережень за коливаннями концентрацій вказаних показників охоплював березень 2017 — грудень 2019 рр. [8]. Відомо, що інтенсивність водовідбору, яка визначає гідродинамічні умови взаємодії поверхневих та підземних вод, є одним з головних чинників зміни їх хімічного складу. Виявлено значущу кореляцію між концентраціями Mg, SO_4, Cl та їх нормованими показниками за величиною водовідбору. Коефіцієнти кореляції Пірсона *R* становили, відповідно: для Mg*R*= 0,82; для SO_4*R* = 0,63; для Cl*R* = 0,76. Також було виконано порівняння основних показників хімічного складу

підземних вод з величиною водовідбору [9]. Отримані результати свідчать, що у водоносному горизонті тріщинуватої зони кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання під час збільшення водовідбору підвищується вміст мінеральних речовин, що підтверджує гіпотезу про істотну роль антропогенного чинника у ході формування хімічного складу досліджуваних підземних вод.

Авторами було проаналізовано 9 мікроелементів (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ba, Pb). Це дає змогу оцінити підземні води з точки зору потенційних ризиків для здоров'я населення, що їх споживають. Виконано порівняльний аналіз мікроелементного складу підземних вод з величинами біологічно значимих концентрацій (БЗК), обрахованих за методикою [10], а також з нормативами [11] (World Health Organization, 2022). У результаті гідро геохімічного аналізу не виявлено перевищень нормативів рекомендованих ВООЗ для досліджуваних мікроелементів. Натомість спостерігаються істотні відхилення від величин БЗК — зафіксовано нестачу у воді таких елементів як Li, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd та Pb.

Встановлено закономірності розподілу і форми знаходження мікроелементів в біокосних системах природних та урбанізованих ландшафтах лісостепової зони України. Отримано фонові значення валових форм мікроелементів та їх рухомих форм в основних типах ґрунтів умовно чистих територій. Вміст важких металів в ґрунтах міста Бровари підвищений в порівнянні з фоновими територіями. Отримано дані, щодо високого вмісту важких металів у ґрунтах Київського полігону № 5, які значно перевищують фонові показники. Встановлено особливості мікроелементного складу підземних вод, що використовуються для питного водопостачання мешканців с. Високий Камінь Коростишівського району Житомирської області.

Література

1. Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., Сорокіна, Л. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів.Результати аналізу.Київ: ГО Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023.

2. Koshliakova, T., Zlobina, K., Kuraieva, I., ActaGeochimica, 2023, Vol.42, Iss.381, pp. 535-551. https://doi.org/10.1007/s11631-023-00604-y

3. Полупан, М.І., Соловей, В.Б., Величко, В.А. Карта «Ґрунти України» м-бу 1 : 1 430 000. Київ-Харків, 2005.

4. Кураєва І.В., Сплодитель А.О., Кошлякова Т.О., Дерюгіна О.В., Азімов О.Т., Вовк К.В., *Вісник Одеського національного університету.* Географічні та геологічні науки. – Одеса, 2024. – № 29 (1(44). – С. 213–231.

5. Splodytel, A.O. J. Geol., Geograph. AndGeoecol., 2020,Vol. 29, No. 3, pp. 580-590. https://doi.org/10.15421/112053

6. Азімов, О., Кураєва, І., Трофимчук, О., Злобіна, К., Кармазиненко, С.*Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка.* 2020, Геол. Вип. 4 (91). С. 56—60. http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08

7. Кураєва, І.В., Кошлякова, Т.О., Азімов, О.Т., Злобіна, К.С., Хрущов, Д.П. *Геохімія техногенезу.* 2021, Вип. 6 (34). С. 113—122. https://doi.org/10.15407/geotech2021.34.113

8. Кошлякова, Т., Кураєва, І., Кошляков, О., Олексенко, Л., Швайка, І., Проскурка, Л.*Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка.*2022,Геол. № 2 (97). С. 85—91.https://doi.org/10.17721/1728-2713.97.11

9. Koshliakova, T., Kuraieva, I. *J. Geol., Geograph. AndGeoecol*.,2023,Vol. 32, No. 3, Dnipro, UA, pp. 525-539. https://doi.org/10.15421/112347

10. Барвиш, М.В., Шварц, А.А. *Геоекол., инж. геол., гидрогеол., геокриол*.2020, № 5. 467—473.

11.Guidelinesfordrinking-waterquality: fortheeditionincorporatingthefirstandsecondaddenda. 2022, Geneva: WorldHealthOrganization. URL:https://www.who.int/publications/i/item/9789241547611

PATTERNS OF MICROELEMENTS DISTRIBUTION IN BIOGEOCENOSES OF NATURAL AND URBANIZED LANDSCAPES OF THE FOREST-STEP ZONE OF UKRAINE

Iryna KURAIEVA
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34 Palladina Ave., Kyiv-142, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3113-7782

Tetiana KOSHLIAKOVA
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34 Palladina Ave., Kyiv-142, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-8551-3531

Anastasia SPLODYTEL
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34 Palladina Ave., Kyiv-142, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-8109-3944

Olena DERIUHINA
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34 Palladina Ave., Kyiv-142, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0009-0004-0220-635X

Olexander AZIMOV
Institute of Geological Science of the NAS of Ukraine
55B, Olesya Honchara Str., Kyiv, 01054, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-5210-3920

Ludmyla LEMESH
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34 Palladina Ave., Kyiv-142, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0009-0003-4847-6139

Abstract

The patterns of distribution of trace elements in bio-inert systems (soils, natural waters) of natural and urbanized landscapes of the forest-steppe zone of Ukraine were studied. The data were obtained on the gross content of heavy metals in soils of conditionally clean territories of Kyiv, Cherkasy and Poltava regions, as well as urbanized landscapes of the city of Brovary and Kyiv landfill №5. In the soils of the city of Brovary and landfill №5, the content of heavy metals significantly exceeds background indicators. The authors conducted research on the trace element composition of drinking groundwater in the territory of Korostyshiv district of Zhytomyr regions. An insufficient amount of Li, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb was found. In the future, it is necessary to conduct monitoring observations of changes in the chemical composition of groundwater in Korostyshiv district of Zhytomyr regions.

Keywords: *microelements, conditionally clean territories, urbanized territories, mobile forms, migration, underground water.*

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331477

МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ: ОГЛЯД ВПЛИВУ НА ПЕРСОНАЛ ТА СТРАТЕГІЯ ЗАХИСТУ

Віталій НЕСІН
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України
вул. Миколи Василенка, б. 3, Київ, 03113, Україна
e-mail: witnes@ukr.net

Анотація

Огляд присвячений основним діапазонам електромагнітного випромінювання та його застосуванню в неруйнівному контролі якості промислової продукції. Розглянуті характеристики випромінювання для безпосередніх органолептичних та опосередкованих методів контролю. Проаналізовані фізичні принципи роботи, переваги, обмеження та гігієнічні ризики для персоналу у діапазонах від гамма випромінювання до радіохвиль. Окрему увагу приділено впливу ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, що формують критичні навантаження на органи зору та шкіру операторів. Висновки підкріплені порівняльною таблицею діапазонів, методів контролю, небезпеки та ефективності захисту.

Ключові слова: *електромагнітне випромінювання, органолептичні методи контролю якості, нормативні вимоги, засоби захисту.*

Неруйнівні методи контролю якості продукції, в яких використовується електромагнітне випромінювання (ЕМВ) різних діапазонів, реалізуються як із застосуванням спеціальних приладів, так і за допомогою лише органів чуття. Безпосередня взаємодія організму людини з ЕМВ певних діапазонів та/або високої інтенсивності такого випромінювання неможлива через значну потенційну шкоду. Органолептичні методи виявлення поверхневих дефектів продукції ефективніші за методи, в реалізації яких застосовується складне високо вартісне обладнання. Вдосконалення захисту організму людини від шкідливих параметрів ЕМВ з метою розширення можливостей органолептичних методів контролю якості є актуальною науковою задачею.

Застосування органолептичних методів в процесі неруйнівного контролю якості в малому, середньому машинобудуванні, будівельній галузі та приладобудуванні відбувається значно частіше за методи, які потребують використання високовартісного обладнання та матеріалів. Спостерігається тенденція до заміни процесів рентгенівського, ультразвукового, вихретокового контролю на капілярний, магнітний, візуальний та тепловий методи у випадках, коли передумов виникнення та зовнішніх ознак дефектності виробу немає. Оскільки інтенсивне застосування діапазону від 100 нм до 1 мм вимагає детальної розробки процедур охорони праці фахівців з неруйнівного контролю якості – вказана проблематика є актуальною

для усіх суб'єктів виробничої та експертної сфери, де готують і атестують персонал, який займається виконанням відповідних досліджень.

Метою огляду є визначення наявного рівня науки і техніки в галузі використання ЕМВ для вибору оптимальних перспективних напрямків досліджень впливу ЕМВ на процеси в організмі та розробка засобів захисту людини при здійсненні органолептичних методів неруйнівного контролю (НК).

ЕМВ, що генерується на земній поверхні, як таке, що доходить до неї з космічного простору, використовується різними видами та методами НК [1, 2]..

Космічне випромінювання довжиною хвилі до 5 нм до земної поверхні не дістається і на поверхні Землі в промислових масштабах не генерується. Для задач контролю якості не застосовується. Захистом від такого ЕМВ є шар атмосфери.

Рентгенівське і, зокрема, *гамма випромінювання* має велику здатність проникнення через щільні матеріали. За умови значної інтенсивності, це ЕМВ активно впливає на будову неорганічних речовин та порушує функціонування, організовану діяльність та саме існування живої матерії. Відповідно методи НК [4 – 6], які застосовують це ЕМВ, не є органолептичними. Але для виявлення внутрішніх дефектів виробів зі щільних матеріалів є ефективними. Огляд результатів взаємодії ЕМВ цього діапазону із контрольованим об'єктом відбувається опосередковано шляхом ознайомлення з рентгенівськими чи флуоресцентними знімками або ж із динамічним перетвореним зображенням на моніторі. Флуоресцентні знімки на відміну від рентгенівських формуються на плівці або іншому детекторі випромінюванням меншої інтенсивності із застосуванням свинцевого підсилюючого екрану. Pb є результатом довгого шляху перетворень радіоактивних матеріалів. Кожний радіоактивний елемент, шляхом розпаду, досягає стабільного стану, перетворюючись на свинець. Але присутність радіоактивного випромінювання викликає активну реакцію ядра Pb. Таким чином, тонкий шар свинцю або свинцево-олов'яної фольги, формує знімки щільних об'єктів контролю експонуванням плівки вторинними електронами, збудженими рентгенівськими фотонами. Така схема формування зображення дозволяє застосовувати опроміненням невеликої інтенсивності. Товщина представлених на ринку свинцевих флуоресцентних екранів рентгенівських плівок становить 0,05 мм; 0,1 мм; 0,2 мм [7]. Захист від рентгенівського діапазону ЕМВ полягає в обмеженні часу дії або інтенсивності. Інтенсивність зменшується пропорційно до збільшення квадрату відстані до джерела випромінювання або застосуванням захисного матеріального ущільнювального фільтру між джерелом і людиною або ж екрану, який розсіює чи відбиває ЕМВ.

Ультрафіолетове випромінювання (УФВ) разом із видимим та інфрачервоним відноситься до оптичного у відповідності із п. 2.77 ДСТУ EN165-2001 [3]. Застосовується в органолептичних капілярних [8, 9] та магнітних [10, 11] методах контролю якості. Діапазон УФВ умовно поділений на 3 проміжки.

Ближній УФ-А (або UV-A) зазначений в п. 2.125 ДСТУ EN165-2001 [3]. Має діапазон від 315 до 400 нм. Для потреб НК та для контролю бланків суворої звітності (грошей, акцизних марок, паспортів, тощо) ультрафіолетовими опромінювачами та детекторами валют генерується УФ-А довжиною хвиль 392-398 нм. Люмінесцентні фарби на контрольованих поверхнях під дією цього випромінювання проявляються контрастним рисунком. Проміжок від 380 до 400 нм одночасно належить до спектру видимого випромінювання. Захист очей не потрібен при тій інтенсивності, яка досягає земної поверхні та згенерована технічними засобами.

Середній діапазон УФВ з довжиною хвиль від 280 до 318 нм. Позначається УФ-В (або UV-B). Зазначений в п. 2.126 ДСТУ EN165-2001 [3]. Міститься у сонячному випромінюванні, яке досягає земної поверхні.

Дальній від видимого випромінювання діапазон УФВ має діапазон від 100 до 280 нм. Позначається УФ-С (або UV-C). Зазначений в п. 2.127 ДСТУ EN165-2001 [3]. У сонячному випромінюванні, яке досягає земної поверхні хвилі довжиною від 100 до 180 нм. відсутні, вони поглинаються атмосферою. Ділянка від 180 до 280 нм. також відсутня в сонячному промені. Але вона генерується деякими штучними джерелами для практичного застосування. Від ЕМВ цього діапазону очам людини потрібен захист.

Видимий спектр ЕМВ зазначений в п. 2.133 ДСТУ EN165-2001 [3]. Має діапазон від 380 до 780 нм. разом із ультрафіолетовим та інфрачервоним відноситься до оптичного у відповідності із п. 2.77 ДСТУ EN165-2001 [3]. Впливаючи на світлочутливу речовину (родопсин) елементів сітківки, ЕМВ цього діапазону, викликає елементарні оптичні імпульси. Динамічність зорового сприйняття здається неперервним. Але відновлення порцій родопсину в світлочутливих колбочках та паличках з одночасним відведенням продуктів розпаду (ретинену та протеїну) відбувається з певною дискретністю. Значення цієї частоти мерехтливого візуального сприйняття світу становить від 15 до 50 Гц. У режимі пошуку для фіксації на об'єкті достатньо 0,022 с (близько 50 Гц.), а в разі зорової втоми зменшується до 3 - 8 Гц [12]. Застосовується зір в НК надзвичайно активно в усіх методах. В органолептичних методах, якими є візуально-оптичний (VT) [13 – 15], магнітопорошковий (МТ) [10, 11] та капілярний (РТ) [8, 9] видиме ЕМВ та його взаємодії з родопсином є фізичною основою для здійснення контролю. Захист від видимого випромінювання потрібно здійснювати за умови високої його інтенсивності, або від сконцентрованого лінзою променя у фокусі.

Інфрачервоне випромінювання зазначене в п. 2.55 ДСТУ EN165-2001 [1]. Має діапазон від 780 до 1 мм. разом із ультрафіолетовим та видимим відноситься до оптичного у відповідності із п. 2.77 ДСТУ EN165-2001 [1]. Має три виділені діапазони: ІЧ-А 780 нм - 1400 нм; ІЧ-В 1400 нм - 3000 нм; ІЧ-С 3000 нм - 1 мм. Застосовується у тепловому контролі. Крім того в техніці застосовується випромінювання 850-950 нм для пультів дистанційного керування. Захист очей потребує від діапазонів ІЧ-А та ІЧ-В великої інтенсивності.

Діапазон радіохвиль довжиною від 1 мм застосовується в радіохвильових методах контролю. Характеризується значним поглинання хвиль щільними об'єктами контролю. Енергія цього діапазону випромінювання переходить в тепло. Крім контролю це ЕМВ використовується в побуті (мікрохвильовки) та в радіолокації, телебаченні, мобільному та радіо зв'язку. Захист від цього випромінювання здійснювати потрібно обов'язково, особливо за умови його високої інтенсивності. Основні результати проведеного огляду синтезовані в доданій таблиці 1.

Висновки

На підставі систематизованого аналізу наукових джерел встановлено, що в оптичному діапазоні електромагнітного випромінювання (100 нм – 1 мм), у межах якого реалізуються основні органолептичні методи неруйнівного контролю, використання спеціалізованих засобів інтенсивного захисту за умов низької потужності випромінювання, як правило, не є необхідним. За високих інтенсивностей ЕМВ цього спектрального інтервалу пріоритетними засобами безпеки залишаються лімітування часу експозиції та збільшення відстані до джерела. Подальші дослідження доцільно зосередити на вивченні фізико-біологічних властивостей і практичних аспектів використання піддіапазонів 315 – 400 нм, 380 – 780 нм, 850 нм – 1 мм, а також випромінювання з довшими хвилями.

Табл. 1.

№ з/п	Назва діапазону випромінювання	Параметри	Методи контролю	Потреба в захисті персоналу
1.	Космічне	До 5 нм	Не застосовується	Захист шаром атмосфери
2.	Рентгенівське (та гамма)	5 нм - 100 нм	Радіографічний, радіометричний, радіоскопічний	Безпосередня взаємодія неможлива, потрібне екранування, обмеження часу дії та/або збільшення відстані до джерела
3.	Дальнє ультрафіолетове UV-C	100 нм - 280 нм	Не застосовується	Потрібен захист очей та шкіри
4.	Середнє ультрафіолетове UV-B	280 нм - 318 нм	Не застосовується	Потрібен захист очей та шкіри
5.	Ближнє ультрафіолетове UV-A	315 нм - 400 нм	Капілярні та магнітні	Особливий захист очей та шкіри не потрібен
6.	Видиме	380 нм – 780 нм	Усі органолептичні та не органолептичні	Захист очей та шкіри не потрібен в межах нормальної інтенсивності світлового потоку
7.	Інфрачервоне Ч-А	780 нм - 1400 нм	Теплові	Особливо потрібен захист очей та шкіри за великої інтенсивності потоку випромінювання
8.	Інфрачервоне ІЧ-В	1400 нм - 3000 нм	Теплові	Особливо потрібен захист очей та шкіри за великої інтенсивності потоку випромінювання
9.	Інфрачервоне ІЧ-С	3000 нм - 1 мм	Теплові	Бажаний захист очей та шкіри за великої інтенсивності потоку випромінювання
10.	Радіохвильове	від 1 мм	Радіохвильові	Особливо потрібен захист усіх тканин організму за великої інтенсивності потоку випромінювання

Література

1. ДСТУ 2865-94 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення.

2. ДСТУ EN ISO 17635:2018 (EN ISO 17635:2016, IDT; ISO 17635:2016, IDT) Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Загальні правила для металевих матеріалів.

3. ДСТУ EN165-2001 (EN165-1996, IDT) Засоби індивідуального захисту очей. Термінологічний словник.

4. ДСТУ EN ISO 17636-1:2014 (EN ISO 17636-1:2013, IDT)Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 1. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням плівки.

5. ДСТУ EN ISO 10675-2:2018 (EN ISO 10675-2:2017, IDT; ISO 10675-2:2017, IDT) Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 2. Алюміній та його сплави.

6. СОУ НАЕК 050:2015 Технічне обслуговування та ремонт. Контроль неруйнівний радіографічний. Методика контролю зварних з`єднань і наплавлень.

7. Екрани. Витратні матеріали для рентгенівської дефектоскопії. https://xn—80axbhcacim8d.com.ua/ua/g24304407-ekrany (Дата звертання 09.06.2025 р.).

8. ДСТУ CEN/TS 17100:2022 (CEN/TS 17100:2017, IDT) Неруйнівний контроль - Пенетрантний контроль - Еталонні фотографії та розмір індикацій.

9. СОУ НАЕК 014:2013 Технічне обслуговування та ремонт. Контроль неруйнівний капілярний. Методика контролю основних матеріалів (напівфабрикатів), зварних з'єднань і наплавлень обладнання та трубопроводів АЕУ.

10. ДСТУ EN ISO 17638:2018 (EN ISO 17638:2016, IDT; ISO 17638:2016, IDT) Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль.

11. ДСТУ EN ISO 9934-1:2018 (EN ISO 9934-1:2016, IDT; ISO 9934-1:2016, IDT) Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги.

12. Гайдукевич В.А., Потійчук О.Б. Основи транспортної психології. Навч. посібник.- Рівне: НУВГП, 2912.-207 с.

13. ДСТУ EN ISO 17637:2017 (EN ISO 17637:2016, IDT; ISO 17637:2016, IDT) Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням.

14. ДСТУ EN 13100-1:2017 (EN 13100-1:2017, IDT) Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 1. Візуальний контроль.

15. ДСТУ EN 13018:2017 (EN 13018:2016, IDT) Неруйнівний контроль. Візуальний контроль. Загальні принципи.

NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS UTILIZING ELECTROMAGNETIC RADIATION: A REVIEW OF PERSONNEL EXPOSURE AND PROTECTION STRATEGIES

Vitalii NESIN
Ukrainian Scientific and Research Institute
of Special Equipment and Forensic Expertise
of the Security Service of Ukraine
vul. Mykoly Vasylenka, b. 3, Kyiv, 03113, Ukraine
https:/orcid.org/0000-0002-4799-4239

Abstract

An overview dedicated to the main ranges of electromagnetic radiation and its application in the non-destructive quality control of industrial products. The characteristics of radiation for direct organoleptic and indirect control methods are discussed. The physical principles of operation, advantages, limitations, and hygiene risks for personnel in ranges from gamma radiation to radio waves are analyzed. Particular attention is paid to the impact of ultraviolet and infrared radiation, which create critical loads on the eyes and skin of operators. The conclusions are supported by a comparative table of ranges, control methods, hazards, and protection effectiveness.

Key words: electromagnetic radiation, organoleptic methods of quality control, regulatory requirements, means of protection.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.333335

GREEN PRODUCTION AND CHARACTERISATION OF HIGH-VALUE THERAPEUTIC PROTEINS IN EDIBLE PLANTS

Yelizaveta PROKHOROVA [1, 2], Nataliia SHCHERBAK [2], Piers HEMSLEY [1]
[1] *The Division of Plant Sciences, School of Life Sciences, University of Dundee;*
Cell and Molecular Sciences, The James Hutton Institute
Dow Street Dundee, DD1 5EH, Scotland, UK
[2] *Institute of Cell Biology and Genetic Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine*
Zabolotnoho 148 str., 03143 Kyiv, Ukraine
e-mail: yprokhorova001@dundee.ac.uk

Abstract

This work explores plant-based strategies for the sustainable production of proteinatious pharmaceuticals and other high-value proteins, using transient and stable transformation. The first approach focuses on engineering safe-to-eat plants free from various bacterial pathogens via introducing genes encoding antibacterial proteins, such as colicin M. The second strategy substitutes plant sources to produce unique proteins in climate-resilient crops, exemplified by the thaumatin II, a natural low-calorie sweetener protein. Finally, the usage of plants as green bioreactors for the pharmaceuticals production, such as human interferon α2b, an essential medicine for antiviral and anticancer treatments.

Key words: *plant-based protein production, sustainable production, Agrobacterium-mediated transformation, transgenic plants, plant bioreactors, Colicin M, Thaumatin II, Human interferon α2b.*

Plant-based protein production systems offer key advantages over traditional platforms such as bacterial, yeast, or mammalian cells, making them attractive for pharmaceutical and nutraceutical applications. Plants provide a safe production environment, generally free from antibiotics, toxins, and human pathogens [1]. The natural encapsulation of proteins by the plant cell wall provides protection against proteolytic enzymes, enabling oral immunisation and targeted delivery through the gastrointestinal tract [2].

From an environmental perspective, plant-produced proteins can be stored in plant dry biomass, eliminating the need for cold chain logistics and lowering the carbon footprint. Moreover, plants allow for overcoming the need for large-scale fermenters, aseptic conditions and high-energy inputs. These align with several of the UN's Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 3 (good health and well-being), SDG 9 (industry, innovation and infrastructure), and SDG 13 (climate action).

For these reasons, we developed both transient and stable expression plant systems, using the *Agrobacterium*-mediated transformation, targeting several goals: improving food safety, replacing the environmentally damaging extraction of natural compounds, and enabling cost-effective pharmaceutical protein production.

The first strategy focused on obtaining safe-to-eat leafy vegetables resistant to bacterial contamination. Green leafy vegetables, such as lettuce, are often linked to *Escherichia coli* outbreaks, which pose serious public health concerns due to numerous reports of severe disease and fatalities. Moreover, *E. coli* strains causing escherichiosis have shown increasing resistance to major antibiotics and are classified by WHO as "critical priority pathogens" [3].

To address this, the gene encoding colicin M (ColM) - a toxin effective against pathogenic *E. coli*, was introduced into lettuce and broccoli through *Agrobacterium*-mediated transformation (picture 1.a-b). All selected transgenic plant lines expressing ColM performed antibacterial activity (picture 1.c). Lettuce extracts successfully inhibited the growth of major pathogenic strains (including EHEC O157:H7 and O104:H4), demonstrating potential as an antibacterial food and feed supplement. Additionally, in dried plant material, ColM retained biological activity with no significant activity loss up to 3 months at room temperature, supporting the feasibility of cold chain-independent storage [4].

Fig.1. *ColM production in plants. (a) In vitro culture of transgenic lettuce expressing ColM protein on B5 medium Kin 3 mg/l, NAA 0.2 mg/l, PPT 5 mg/l; (b) in vitro culture of transgenic broccoli expressing ColM protein on MS medium BAP 3,5 mg/l, NAA 0.02 mg/l, PPT 5 mg/l; (c) antibacterial activity of explants of different transgenic lines of T1 generation against a model laboratory strain of E. coli XL1-Blue*

In a second application, we aimed to produce thaumatin II, a sweet-tasting protein from *Thaumatococcus danielli*, which is up to 100,000 times sweeter than sugar [5]. However, natural extraction is geographically limited and ecologically harmful. In contrast, sugar production uses more than 31 million hectares of agricultural land worldwide. Significant ecological effects of the widespread production of sugar crops include soil degradation, deforestation, high water and energy consumption, and chemical inputs [6].

To create a more suitable alternative, the thaumatin II gene was inserted into lettuce and tobacco genomes. However, lettuce was found to be an unsuitable host due to thaumatin's toxic effect on this plant. We hypothesise that thaumatin's original function as a stress-response protein [7], and its stable overexpression, may trigger defence pathways in lettuce, exhausting metabolic resources and inhibiting development. Meanwhile, tobacco plants maintained a healthy phenotype, detectable foreign protein expression, and produced a sweeter taste profile, indicating their potential as a host for sweet protein production in temperate climates.

Lastly, plants were used as bioreactors for the human interferon α2b (IFNα2b) production, an essential cytokine used in antiviral and anticancer therapies [8]. While production in traditional platforms is expensive, here we used *Nicotiana benthamiana* and transgenic broccoli, with broccoli offering the added benefit of inherent anticancer properties. This dual approach may enhance antiproliferative activity by creating synergy between the host plant and the therapeutic protein. For antiviral application, oral administration of IFNα2b, unlike injectable forms, activates systemic

immunity at doses approximately 10^4-fold times lower [9], making edible plants an advantageous delivery system due to the natural encapsulation by the plant cell wall.

Initial expression of IFNα2b showed that it not only has a short blood serum half-life [10] but is also quickly degraded in the plant apoplast, leading to a loss of functional protein (picture 2). To produce IFNα2b with a longer window of action and enhanced storage stability, we tested several strategies, including protein modifications and co-expression with protease inhibitors and helper enzymes in *Nicotiana benthamiana*. We co-expressed IFNα2b with several pathogen-triggered immunity suppressors from *Phytophthora infestans* (e.g., PiTG_04314, PiTG_22926, PiTG_02860, AVR2-SP, GR103-1) [11] alongside the tomato protease inhibitor *Sl* CYS8 [12]. However, this combination did not show any positive effect on IFNα2b accumulation, but developed protocols could be adapted for the expression of other proteins of interest. Further optimisation studies are in progress; however, specific details remain confidential at this stage.

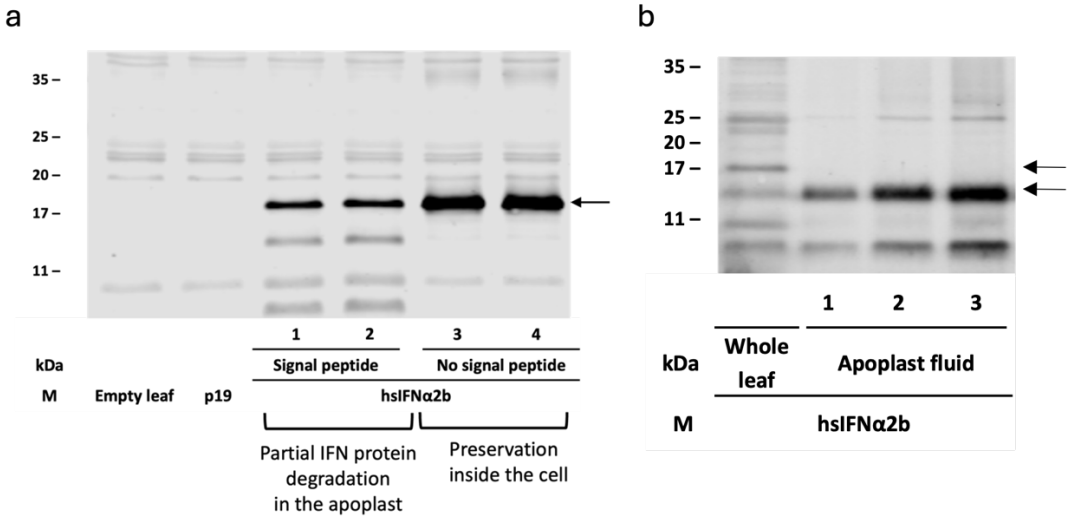


Fig. 2. *Expression of IFNα2b in N. benthamiana was analysed via immunoblot with polyclonal IFN antibody.* ***(a)*** *Pattern of IFNα2b with and without signal peptide: M – NSR molecular weight marker; p19 – negative control, suppressor of RNA silencing; 1,2 - IFNα2b construct with calreticulin SP; 3,4 - IFNα2b construct without calreticulin SP. Results are presented in 2 technical repeats.* ***(b)*** *Comparative analysis of IFNα2b extracts derived from the whole leaf tissue versus apoplastic fluid. Expected size of IFNα2b – 19 kDa, in case of partial IFN protein degradation – 7, 15 kDa fragments were observed*

Together, all mentioned approaches demonstrated the flexibility and potential of plant systems for sustainable, cost-effective and safe biomanufacturing. Further work will focus on enhancing the activity and stability of therapeutic proteins and developing a universal edible production system.

References

1. Yao, J., et al., *Plants as Factories for Human Pharmaceuticals: Applications and Challenges.* Int J Mol Sci, 2015. **16**(12): p. 28549-65.
2. Eidenberger, L., B. Kogelmann, and H. Steinkellner, *Plant-based biopharmaceutical engineering.* Nature Reviews Bioengineering, 2023. **1**(6): p. 426-439.
3. Sheu, C.-C., et al., *Infections Caused by Carbapenem-Resistant Enterobacteriaceae: An Update on Therapeutic Options.* Frontiers in Microbiology, 2019. **10**: p. 80.
4. Shcherbak, N., et al., *Accumulation of colicin M protein and its biological activity in transgenic lettuce and mizuna plants.* Frontiers in Plant Science, 2023. **14**.

5. Dahal, N. and X.M. Xu, *Sweetest Protein -Thaumatin.* Journal of Food Science and Technology Nepal, 2014. **7**.

6. Hashem, K., et al., *Does sugar pass the environmental and social test?* 2015.

7. Joseph, J.A., et al., *Bioproduction of the Recombinant Sweet Protein Thaumatin: Current State of the Art and Perspectives.* Frontiers in Microbiology, 2019. **10**.

8. Sadler, A.J. and B.R. Williams, *Interferon-inducible antiviral effectors.* Nat Rev Immunol, 2008. **8**(7): p. 559-68.

9. Radwanski, E., et al., *Pharmacokinetics of Interferon α-2b in Healthy Volunteers.* The Journal of Clinical Pharmacology, 1987. **27**(5): p. 432-435.

10. Raghuvanshi, V., P. Yadav, and S. Ali, *Interferon production by Viral, Bacterial & Yeast system: A comparative overview in 2023.* International Immunopharmacology, 2023. **120**: p. 110340.

11. Wang, S., et al., *Phytophthora infestans RXLR effectors act in concert at diverse subcellular locations to enhance host colonization.* Journal of Experimental Botany, 2018. **70**(1): p. 343-356.

12. Jutras, P.V., et al., *Activity-based proteomics reveals nine target proteases for the recombinant protein-stabilizing inhibitor SlCYS8 in Nicotiana benthamiana.* Plant Biotechnology Journal, 2019. **17**(8): p. 1670-1678.

«ЗЕЛЕНЕ» ВИРОБНИЦТВО ТА АНАЛІЗ ЦІННИХ ТЕРАПЕВТИЧНИХ БІЛКІВ У ЇСТІВНИХ РОСЛИНАХ

Єлізавета ПРОХОРОВА
Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України
вул. Академіка Заболотного, 148, 03143 Київ, Україна
Університет Данді; Інститут Джеймса Хаттона
Dow Street Dundee, DD1 5EH, Scotland, Великобританія
https://orcid.org/0000-0003-4227-7772

Наталія ЩЕРБАК,
Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України
вул. Академіка Заболотного, 148, 03143 Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-2478-8408

Пірс ХЕМСЛІ
Університет Данді; Інститут Джеймса Хаттона
Dow Street Dundee, DD1 5EH, Scotland, Великобританія
https://orcid.org/0000-0003-2950-0634

Анотація

У цій роботі досліджуються стратегії сталого виробництва фармацевтичних білків та інших цінних біомолекул із використанням транзієнтної й стабільної генетичної експресії в рослинних системах. Перший підхід передбачає створення безпечних для споживання рослин, резистентних до бактеріальних патогенів, шляхом інтеграції генів, що кодують антибактеріальні білки, зокрема коліцин М. Друга стратегія спрямована на використання альтернативних, кліматостійких культур як джерела унікальних білків, таких як тауматин ІІ – природний низькокалорійний білок-цукрозамінник. І також, розглядається використання потенціалу їстівних рослин як «зелених» біореакторів для виробництва білків фармацевтичного призначення, зокрема людського інтерферону α2b – ключового агенту з противірусною та протипухлинною активністю.

Ключові слова: рослинна система білкового синтезу, стале виробництво, *Agrobacterium*-опосередкована трансформація, генетично модифіковані рослини, рослинні біореактори, коліцин М, тауматин ІІ, рекомбінантний людський інтерферон α2b.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332978

THERMODYNAMIC PREDICTION FOR CREATION OF NOVEL ENVIRONMENT BIOTECHNOLOGIES

Oleksandr TASHYREV[1,2], Vira HOVORUKHA[1,2], Galyna GLADKA[2], Iryna BIDA[2], Illia KOSTIUK[2]
[1]*Institute of Environmental Engineering and Biotechnology*
University of Opole, 45-040, Opole, Poland
[2]*Institute of Microbiology and Virology of the National Academy of Sciences of Ukraine*
Zabolotny 154 str., 03143 Kyiv, Ukraine
e-mail: oleksandr.tashyrev@uni.opole.pl

Abstract
This study describes the creation of a universal biotechnology based on thermodynamic prediction, which enables rapid and efficient fermentation of environmentally hazardous waste, as well as the neutralization of toxic metals, radionuclides and xenobiotics with the simultaneous production of a number of commercially valuable products. A module with an optimized design has been developed for fast and effective fermentation of solid and liquid organic waste with simultaneous precipitation of metals.

Key words: *thermodynamic prediction, anaerobic treatment, organic waste, toxic metals, radionuclides, xenobiotics, environmental biotechnologies.*

Landfills and industrial enterprises are the main sources of severe environmental pollution of the biosphere with a wide range of toxicants [1]. These are four classes of solid and liquid organic pollutants, toxic metals, radionuclides and xenobiotics [2]. Conventional technologies are often inadequate for the effective treatment and detoxification of such waste, resulting in severe environmental contamination [3]. Therefore, the development of novel and effective waste management technologies is imperative.

The objective of this study was to develop and validate a universal biotechnology based on thermodynamic prediction for the complex treatment of four major classes of hazardous waste (multicomponent solid waste, soluble metal compounds and radionuclides as well as xenobiotics) and their conversion into valuable products (energy carriers such as hydrogen and methane, food grade carbon dioxide, metal concentrate and purified water).

Strategic approach has been created that allows obtaining valuable products from all four classes of toxicants. This biotechnology is based on thermodynamic calculations to determine the optimal conditions for the fermentation of organic waste with concurrent of energy carriers' production, and also the most efficient mechanisms of microbial detoxification of soluble toxic compounds. For thermodynamic prediction we applied Pourbaix diagrams – graphical presentation of "Eh-pH" thermodynamic equilibrium state of compound-electrolyte system [4]. A foundational principle of this approach is that microbial catabolism is thermodynamically confined to the water stability zone.

Our calculations identified the optimal reductive conditions at the lower boundary of this zone, corresponding to Eh = -414 mV at a neutral pH of 7.0 (Figure 1).

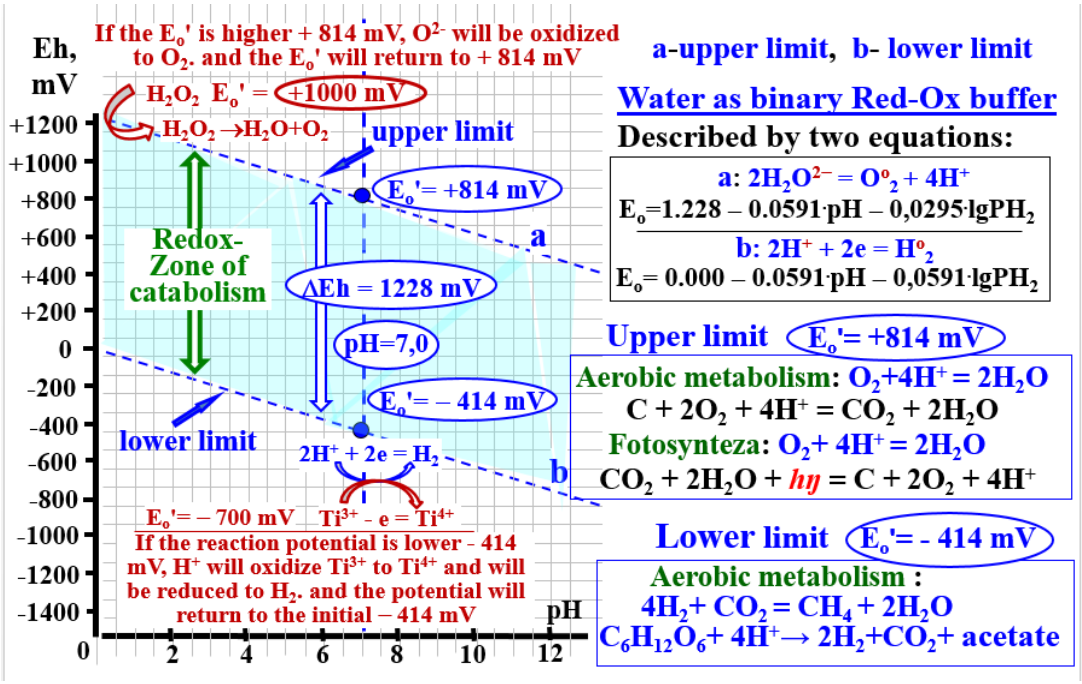


Figure 1. *Thermodynamic calculations: optimal conditions for the fermentation of organic waste with concurrent of energy carriers' production, and also the most efficient mechanisms of microbial detoxification of soluble toxic compounds. - pH = 7.0 and Eh = - 414 mV*

For experimental validation, we designed and constructed a laboratory-scale, direct-flow installation (module) made of transparent acrylic glass (Figure 2). The primary model substrates under investigation are three types of solid waste: sugar beets, potatoes, and fallen leaves. To optimize and accelerate fermentation, we applied granular microbial preparation developed by us [5]. Under regulated microbial metabolism in a direct-flow module, rapid and efficient waste degradation was achieved. The duration of waste degradation was very short, ranging from 3 to 8 days, and the degradation coefficients (Kd), representing the weight reduction multiples, were highly significant, ranging from 96 to 530 (Figure 3). In the aerobic sections of the module, the content of soluble compounds consistently decreased. Their concentration reduced from 5500 to 300 mg/L, and the degradation coefficient was 18. Thus, in the continuous flow mode, rapid and efficient degradation of solid waste was achieved - in the anaerobic sections, while soluble waste was effectively degraded in the aerobic sections.

In the upper part, high-potential conditions (+400 to +500 mV) are formed due to the presence of chromates. However, reductants from the low-potential zone (–280 mV) rapidly reduce chromates in the middle zone (Figure 4) [6]. The high reductase activity of the anaerobic microbiome resulted in a rapid precipitation of chromium, observed as the formation of insoluble $Cr(OH)_3$ Finally, burning of dry biomass, coated with $Cr(OH)_3$, produces a valuable product, abrasive – crystalline Cr_2O_3.

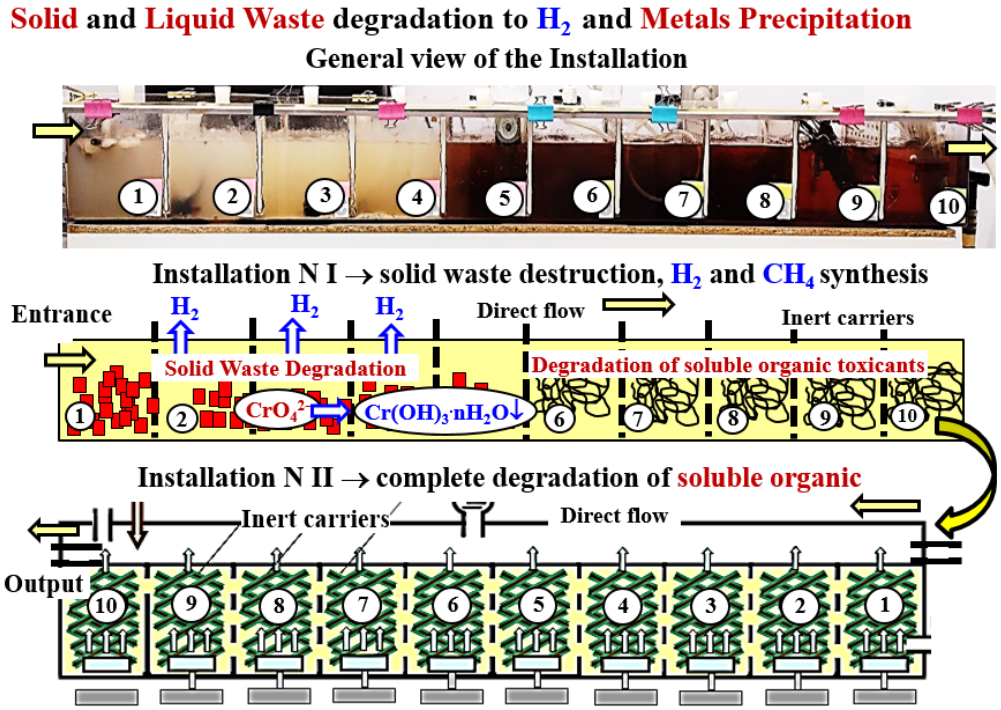


Figure 2. *Simplest direct flow bioreactor – without any devices for mechanical mixing*

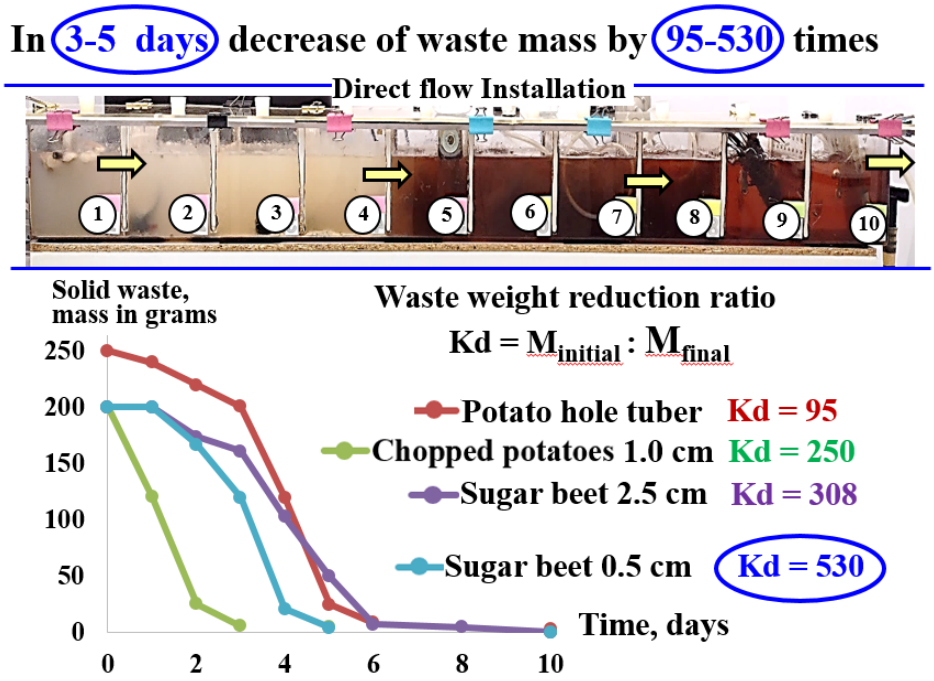


Figure 3. *Fast and effective degradation of solid waste in module (direct flow installation)*

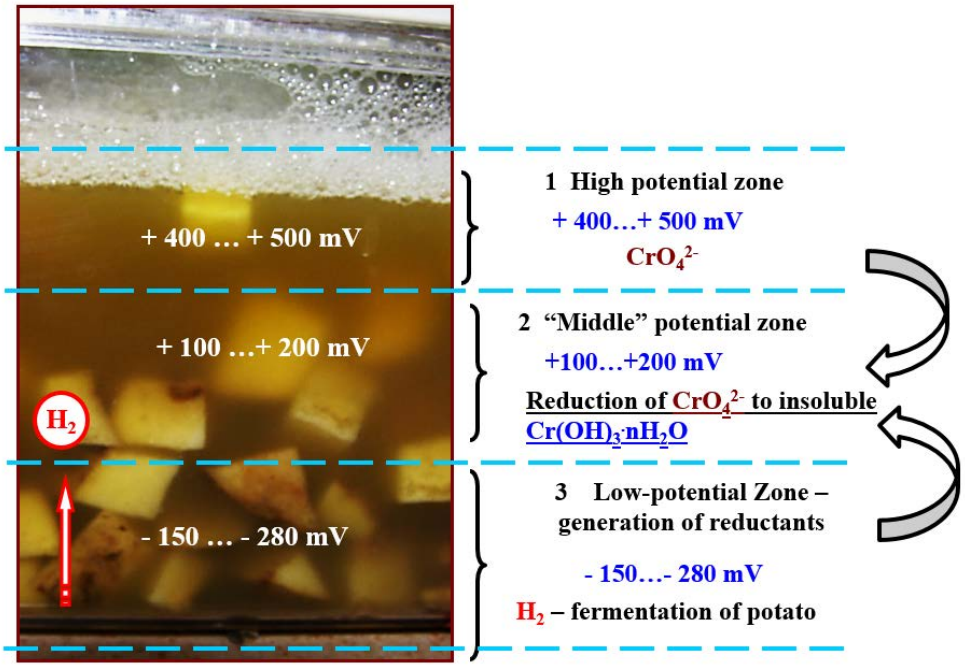


Figure 4. *Stereometric distribution of redox-potential in heterophase system and chromate reduction*

There are three dominant pathways of detoxification: reductive precipitation, precipitation due to pH shift in alkaline zone, accumulation in cells due to stereochemical analogy of macroelements and radionuclides [7]. By combining these three pathways, the granulated preparation extracted almost 100% of U, P and Am from the effluent. Finally dry radioactive granules are safely disposed of by incineration, reducing their weight by 20 times.

The most effective pathway of xenobiotics detoxification – is their reductive degradation, i.e. their use by microorganisms as electrons acceptors. The reduction of unsaturated bonds of the aromatic ring leads to its destabilization, and further degradation to final non-toxic products [8].

Thus, thermodynamic prediction allows distinguishing effective pathways of solving environmental problems requiring effective solution in the world scale. It is a promising method for development universal effective biotechnologies for processing of a wide range of ecologically hazardous wastes: solid and liquid organics, metals, radionuclides and xenobiotics. All toxic waste can be converted into useful products – hydrogen, methane, concentrate of valuable metals, etc. The theoretical bases of environmental biotechnologies developed by us are promising for their industrial implementation to prevent pollution of environment with four types of hazardous waste and bioremediation of contaminated ecosystems.

References

1. Siddiqua, A., Hahladakis, J. N., & Al-Attiya, W. A. K. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research* **2022**, *29*(39), 58514-58536. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z

2. Barik, D., Rakhi Mol, K. M., Anand, G., Nandamol, P. S., Das, D., & Porel, M. Environmental Pollutants Such as Endocrine Disruptors/Pesticides/Reactive Dyes and Inorganic Toxic Compounds Metals, Radionuclides, and Metalloids and Their Impact on the Ecosystem. In *Biotechnology for*

Environmental Sustainability. Singapore: Springer Nature Singapore, **2025**, 391-442. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7221-6_15

3. Saravanan, A., Kumar, P. S., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., & Reshma, B. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere* **2021**, *280*, 130595. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595

4. Pourbaix M. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions, Houston: *NACE* International, Mater. Sci. Forum **1974**, 43–54.

5. Hovorukha, V.; Havryliuk, O.; Gladka, G.; Tashyrev, O.; Kalinichenko, A.; Sporek, M.; Dołhańczuk-Śródka, A. Hydrogen Dark Fermentation for Degradation of Solid and Liquid Food Waste. *Energies* **2021**, *14*, 1831. https://doi.org/10.3390/en14071831.

6. Hovorukha V., Havryliuk O., Tashyreva H., Tashyrev O., Sioma I. Thermodynamic substantiation of integral mechanisms of microbial interaction with metals. *EEEP* **2018**, *2*, 55–63. https://doi.org/10.32006/eeep.2018.2.5563

7. Tashyrev, O., Romanovskaya, V., Rokitko, P., Tashyreva, H., Prytula, I., Suslova, O., ... & Gladka, G. Autecology and Taxonomy of Bacteria Isolated from Extreme Environments. *Microbiological Journal* **2017**, *79*(1), 100-113. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MicroBiol_2017_79_1_11

8. Hovorukha, V. M., Havryliuk, O. A., Gladka, G. V., Bida, I. O., & Tashyrev, O. B. Interaction of obligate anaerobic destroyer of solid organic waste *Clostridium butyricum* GMP1 with soluble compounds of toxic metals Cr(VI), Mo(VI) AND W(VI). *Biotechnologia Acta* **2020**, *13*(5), 73-86. https://doi.org/10.15407/biotech13.05.073

ТЕРМОДИНАМІЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ БІОТЕХНОЛОГІЙ

Олександр ТАШИРЕВ
Інститут інженерії екології та біотехнології
Опольський університет, 45-040, Ополе, Польща,
Інститут мікробіології і вірусології НАН України
Заболотного, 154, 03143 Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7698-5155

Віра ГОВОРУХА
Інститут інженерії екології та біотехнології
Опольський університет, 45-040, Ополе, Польща,
Інститут мікробіології і вірусології НАН України
Заболотного, 154, 03143 Київ, Україна,
https://orcid.org/0000-0003-4265-5534

Галина ГЛАДКА
Інститут мікробіології і вірусології НАН України
Заболотного, 154, 03143 Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3855-1847

Ірина БІДА
Інститут мікробіології і вірусології НАН України
Заболотного, 154, 03143 Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7044-3339

Ілля КОСТЮК
Інститут мікробіології і вірусології НАН України
Заболотного, 154, 03143 Київ, Україна
https://orcid.org/0009-0005-9296-8194

Анотація:
Робота описує створення на основі термодинамічних розрахунків універсальної біотехнології, яка забезпечує швидке та ефективне зброджування екологічно небезпечних відходів, а також знешкодження токсичних металів, радіонуклідів та ксенобіотиків з одночасним отриманням ряду комерційно цінних продуктів. Розроблено модуль з оптимізованою конструкцією для швидкого та ефективного зброджування твердих та рідких органічних відходів з одночасним осадженням металів.

Ключові слова: термодинамічне прогнозування, анаеробне очищення, органічні відходи, токсичні метали, радіонукліди, ксенобіотики, природоохоронні біотехнології.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330364

ВПЛИВ НАДЛИШКОВОГО ВМІСТУ ЦИНКУ В СЕРЕДОВИЩІ КУЛЬТИВУВАННЯ НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ПРОРОСТКІВ РОСЛИН ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ТА СТАН ФОТОСИНТЕТИЧНОГО АПАРАТУ В КЛІТИНАХ

Анастасія ФОМЕНКО[1], Оксана БОНДАРЕНКО[1,2]
[1]*Київський палац дітей та юнацтва*
вул. Івана Мазепи,13, Київ,01010, Україна
[2]*Інститут фізіології рослин і генетики НАН України*
вул. Васильківська, 31/17, Київ, 03122, Україна
e-mail: oks.yur.bondarenko@gmail.com

Анотація. *В роботі досліджували стан проростків пшениці озимої в умовах високого вмісту важкого металу цинку в середовищі культивування. Проведено морфометричний аналіз 35-денних проростків та визначено стан фотосинтетичного апарату листків за вмістом хлорофілу та каротиноїдів. Надлишок цинку викликає у рослин стресову реакцію, прояви якої є підвищення вмісту захисних пігментів, зниження поглинання світла та електронного транспорту за рахунок руйнування СЗК 2. Зниження фотосинтетичної активності безперечно пов'язано із порушенням ростових процесів рослин. Це може призвести до зниження врожайності зернових культур, зокрема пшениці в даних районах. Тому перед відновленням агрономічної діяльності, ґрунти конче потребують очистки.*

Ключові слова: *Triticum aestivum L., пшениця озима, важкі метали, фотосинтетичний апарат, хлорофіл, каротиноїди.*

Світовий показник концентрації цинку в верхньому шарі ґрунту коливається від 5 до 300 мг/кг [1]. В Україні вона становить 13-127 мг/кг, при чому збільшується від Полісся до степу та лісостепу [2]. Водорозчинними формами цинку в ґрунті є солі соляної ($ZnCl_2$), сірчаної ($ZnSO_4$) та азотної ($ZnNO_3$) кислот [3].

За нормальних концентрацій у середовищі цинк є незамінним елементом для підтримки гомеостазу рослин. Він входить до складу ферментів, за участі іонів цинку активізується синтез багатьох органічних речовин. Достатня кількість його в ґрунті обумовлює стійкість організму до посухи та температурних коливань, оскільки даний елемент впливає на процес синтезу фотосинтетичних пігментів та певним чином забезпечує стійкість пігмент-білкових комплексів. Активуючи карбоангідразу, цинк прискорює реакцію дегідратації в процесі фотосинтезу [4]. Цинк контролює синтез амінокислоти триптофану, яка є попередником ауксину, отже регулює ріст, розвиток органів та фототропізм. У нормі в сухій речовині рослини міститься близько 15-60 мг/кг цього елементу [5]. Відомі роботи по дослідженню співвідношення вмісту цинку в різних частинах рослинних організмів. Так, наприклад, співвідношення вмісту цинку в різних частинах організму пшениці озимої розподілене наступним чином: у коренях – 26,2%; у стеблі – 17%; у листках – 17,1%; у колосі – 23,9% [6]. Цинк входить до групи важких металів. За токсичністю він відноситься до другого класу

небезпеки [4]. Надмірний вміст цинку суттєво пригнічує діяльність більшості ґрунтових мікроорганізмів [7]. Через антагоністичну дію, надлишок Zn пригнічує засвоєння купруму, фосфору та феруму рослиною [1, 3]. Сповільнюється ріст та розвиток організмів, виникає хлороз та некроз листків. Суттєво змінюється склад фотосинтетичного апарату.

Донедавна в Україні не було проблеми забруднення ґрунтів цинком. Але у зв'зку з розширенням територій ведення активних бойових дій, схід України, де переважає степовий та лісостеповий ландшафт, найбільш придатний для вирощування аграрної продукції, підпадає під зону забруднень важкими металами, зокрема і цинком. Відомі ранні роботи по дослідженню вмісту цинку в районах військових полігонів, а саме по проведенню аналізу ґрунтово-водного покриву окремих ділянок Яворівського полігону на вміст полютантів. Аналіз виявив істотне збільшення цього металу в ґрунтах. [8]. Окрім руйнації інфраструктури, дії агресора під час повномасштабного вторгнення мають нищівний вплив на аграрну галузь. За попередніми підрахунками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, це спричинило збитків державі на понад 19 мільйонів гривень [9]. Обстріли, вибухи снарядів, робота ППО, розмінування територій та інші воєнні дії, окрім механічної та фізичної шкоди, спричинюють зміну хімічного складу ґрунтів. Воєнна діяльність супроводжується колосальними викидами важких металів, що пізніше осідають та накопичуються у ґрунті [10, 11]. Рослини здатні акумулювати сполуки з середовища, що робить їх непридатними для вживання в їжу тваринами або людиною. Надлишкова кількість важких металів та інших токсичних сполук в харчуванні призводить до появи злоякісних утворень, атеросклерозу, порушення апарату спадковості та зниження імунітету [11].

Постає проблема очищення даних територій від забруднень. Дослідження, які проводилися у численних науково-дослідних установах, довели здатність рослин поглинати із ґрунту мікроелементи, зокрема важкі метали, за рахунок активного контактного поглинання корінням, акумулюючи їх у власних тканинах або на поверхні листків [12]. Така можливість організмів може бути використана для біологічного очищення середовища існування рослин – фіторемедіації. За аналізами: «з фінансової точки зору, біологічний спосіб реанімації ділянок є вигіднішим за хімічний та фізичний [11]. Вартість очищення 1 га потужністю 0,5 м ґрунту становить від 150 USD». Рослини, які були використані під час фіторемедіаційних заходів підлягають утилізації внаслідок високого вмісту в їхніх тканинах важких металів. Рослинну біомасу рекомендують спалювати, попередньо використовуючи відповідні засоби захисту атмосферного повітря, щоб запобігти поширенню токсичних речовин. У результаті шкідливі сполуки залишаються в попелі [10]. Для підбору видового різноманіття, задіяного в фіторемедіації, важливо вивчення накопичення важких елементів в різних структурних частинах рослинних організмів.

Реакція зернових культур на забруднення ґрунтів ВМ є неоднаковою. Найбільш толерантними до них є пшениця та жито, озимі, овес, ячмінь. Жито характеризується найвищим адаптивним потенціалом, а ячмінь — найнижчим. Екологічно безпечний урожай зернових культур формується за вдвічі меншого вмісту ВМ у ґрунті від максимально допустимого рівня. Характерно, що найбільша їх кількість у цієї групи культур накопичується в кореневій системі та вегетативних органах [11]. Зерно ж можна використовувати для технічних цілей.

Для вирішення агроекологічних проблем з можливим використанням врожаю для технічних цілей, було вивчено можливості проростків пшениці існувати в середовищі із високою концентрацією солей цинку. Об'єктом дослідження нами було обрано пшеницю озиму сорту Одеська 267 в якості модельного представника однорічних зернових культур.

Насіння було висаджене на середовище Мурасіге-Скуга в лабораторних контрольованих умовах освітлення та температурного режиму.

Для експерименту було виготовлено три варіанти середовищ для культивування рослин: середовище Мурасіге-Скуга (МС), в якому концентрація сульфату цинку 8,6 мг/л (далі: «контроль»), середовище МС з підвищеним вмістом солі – 11,2 мг/л (далі: «МС+2,6 мг/л $ZnSO_4$»), та середовище МС з найбільшим вмістом сульфату цинку 13,8 мг/л («МС+5,2 мг/л $ZnSO_4$»).

Термін культивування коливався від 13 до 35 діб, оскільки метою дослідження було визначити тенденцію залежності показників фізіологічного стану проростків рослинних організмів від стану забруднення середовища.

По закінченню терміну росту рослин, організми було повністю відокремлено від решток середовища, де вони розвивались. Зайву вологу видаляли серветкою, рослини викладали на однотонному чорному фоні біля лінійки та робили фото. Пізніше за допомогою комп'ютерної програми MapInfo визначали довжину надземної частини та коренів рослин. Після цього за допомогою електронних вагів визначали масу окремо коренів та пагонів.

Для визначення пігментного складу методом Вельбурна у ДМСО (99,9 %, ACS) екстрагували пігменти з листків рослин. Рівень поглинання екстрактів пігментів вимірювали при довжинах хвиль 480, 649 та 665 нм на спектрофотометрі «Specord 200», США. Отримавши дані спектрофотометрії визначали пігментний склад фотосинтетичного апарату. Результати порівнювали між собою та з контрольними зразками. Статистичний аналіз проводили за стандартними програмами MicrosoftExel, середні значення розраховували за даними 3 дослідів по трьох аналітичних повторностях.

В ході досліджень відразу було візуально помічено різницю у швидкості росту і розвитку рослин. Очевидна була залежність швидкості проростання, росту і розвитку проростків від концентрації солі цинку в середовищі, на якому культивували організми. У варіантах зі збільшеною кількістю іонів цинку вже на перших етапах розвитку рослин спостерігали суттєве сповільнення швидкості проростання, особливо гальмування розвитку кореневої системи. Результати спостереження представлені на рисунку 1.

Через 35 діб культивування, було проведено морфометричний аналіз проростків пшениці та визначено пігментний склад фотосинтетичного апарату в листках. Результати метричного аналізу показали, що коренева система проростків, які культивовані на середовищі з додаванням надлишкових кількостей іонів цинку, була істотно недорозвиненою: співвідношення довжин коріння/пагін в контрольному варіанті 0,88 ± 0,02, в найбільш забрудненому (МС+5,2 мг/л $ZnSO_4$) - 0,28 ± 0,05, невисоке збільшення вмісту цинку в середовищі (МС+2,6 мг/л $ZnSO_4$) теж сповільнювало швидкість розвитку вегетативних органів проростків. З чого прогнозовано недостатність забезпечення рослин водою, значить і забезпечення потрібною кількістю поживних речовин. Цей факт може суттєво позначитись на здібності подальшого виживання рослинного організму. Паралельно визначали вагу пагонів та коренів досліджуваних рослин (див. Таблиця 1). Показники ваги коренів та пагонів також зазнали коливань в залежності від вмісту цинку в середовищі. Як і оцінка розмірів, вага частин рослин зменшувалась із підняттям рівня забрудненості.

А. Б.
В.

Рис. 1. *Проростки рослин пшениці озимої сорту Одеська 267, які вирощені в середовищі МС та за різних домішок солей цинку в середовище культивування. А – контроль, середовище МС, Б – МС+2,6 мг/л $ZnSO_4$, В - МС+5,2 мг/л $ZnSO_4$*

Табл. 1. Показники ваги коренів та пагонів

П а г і н			**К о р і н ь**		
контроль, г	**МС+5,2 мг/л $ZnSO_4$, г**	**МС+2,6 мг/л $ZnSO_4$, г**	**контроль, г**	**МС+5,2 мг/л $ZnSO_4$, г**	**МС+2,6 мг/л $ZnSO_4$, г**
0,103±0,017	0,046±0,006	0,054±0,004	0,049±0,006	0,018±0,002	0,038±0,006

Було проведено більш глибокий аналіз стану пігментного складу фотосинтетичного апарату листків проростків рослин пшениці, культивованих в запропонованих умовах. Результати розрахунків основних показників стану фотосинтетичного апарату досліджуваних рослин представлені в таблиці 2.

Табл. 2. Показники співвідношення основних пігментів фотосинтетичного апарату в листках пшениці озимої сорту Одеська 267, вирощених на середовищі Мурасіге-Скуга з різною концентрацією сульфату цинку

Концентрація $ZnSO_4$, мг/л	**Співвідношення хлорофілів *a/b***	**Співвідношення car/chl**
Контроль	4,74±0,05	0,30±0,03
МС+2,6	5,33±0,03	0,34±0,06
МС+5,2 мг/л	5,66±0,08	0,81±0,07

За найвищого вмісту цинку в середовищі спостерігається суттєве збільшення вмісту каротиноїдів у порівнянні з відповідним контрольним зразком, що свідчить про перебування рослини у стресовому стані. Також помічено збільшення відношення хлорофілу *a* до *b*, що вказує на помітне зменшення хлорофілів *b* в пігментному складі світлозбирального комплексу 2.

Результати досліджень показали, що проростки рослин пшениці сорту Одеська 267 в умовах забруднення цинком мають слабо розвинену кореневу систему, що зменшує можливості надходження води та мінеральних речовин до рослини в засушливих районах сходу та півдня країни. Надлишок цинку викликає у рослин стресову реакцію, прояви якого є підвищення вмісту захисних пігментів – каротиноїдів для запобігання розвитку оксидативного стресу та зниження поглинання світла та електронного транспорту за рахунок руйнування СЗК 2. Зниження фотосинтетичної активності є причиною значного зниження ростових процесів рослин. Це може спрогнозувати зниження врожайності зернових культур, зокрема пшениці в

даних районах. Тому перед відновленням агрономічної діяльності ґрунти конче потребують очистки. Фіторемедіація – потім хліборобство.

Література

1. Кучерявий В. П. Екологія. — Львів : Світ, 2001. — 500 с.

2. Полянчиков С.; Логінова І.; Капітанська О. Менеджмент цинку та його значення для рослин // Агроном. — 2020. — Режим доступу: https://www.agronom.com.ua/menedzhment-tsynku-ta-jogo-znachennya-dlya-roslyn/

2. Цинк // Оптимізація живлення: мінеральне живлення. — Режим доступу: https://pni.com.ua/optimizatsiya-zhivlennya/мінеральне-живлення/цинк/

3. Леонідов М. П. Екотоксикологічна оцінка цинку у системі «агрохімікат — ґрунт — рослина» : магістерська кваліфікаційна робота. — 2024. — 43 с. — Режим доступу: https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7a444068-ad65-4b3b-ba69-869f8d9fbe75/content

4. Гнип Г. Цинк впливає на стійкість рослини до несприятливих умов та хвороб // AgroTimes. Агрономія. — 2019. — Режим доступу: https://agrotimes.ua/agronomiya/czynk-vpyvaye-na-stijkist-roslyny-do-nespryyatlyvyh-umov-ta-hvorob/

5. Чи можна вилікувати ґрунт від війни — відповіді на найпоширеніші запитання. — Режим доступу: https://kurkul.com/spetsproekty/1423-chi-mojna-vilikuvati-grunt-vid-viyni--vidpovidi-na-nayposhirenishi-zapitannya

6. Довбаш Н. І. Використання техногенно-забруднених земель у агроландшафтах Лісостепу // Екологізація сталого розвитку інформаційного суспільства : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, студентів і аспірантів, 5–6 листоп. 2014 р. : тези доп. — Харків, 2014. — С. 85–88.

7. Андрієвська О. А. Геохімічний огляд розподілу цинку у компонентах ландшафтів поблизу військових полігонів України // Пошукова та екологічна геохімія. — 2009. — № 1. — С. 48–52. — Режим доступу: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000127213

8. Офіційний вебпортал Верховної Ради України. Новина Комітету. — Прес-служба Апарату Верховної Ради України, 02.03.2023. — Режим доступу: https://www.rada.gov.ua/news/news_kom/233737.html

9. Вовк К. Як війна впливає на родючість ґрунтів та якість їжі. — Режим доступу: https://ecoaction.org.ua/vijna-vplyvaie-na-grunty.html

10. Балюк С. А.; Ладних В. Я.; Фатєєв А. І.; та ін. Рекомендації щодо запобігання забрудненню важкими металами ґрунтів та рослинної продукції в умовах зрошуваного землеробства // Аграрна наука — виробництву. — Київ, 2000. — С. 5–9.

THE EFFECT OF EXCESS ZINC CONTENT IN THE CULTIVATION MEDIUM ON THE MAIN PARAMETERS OF WINTER WHEAT SEEDLINGS AND THE STATE OF THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS IN THE CELLS

Anastasya FOMENKO
Kyiv Palace of Children and Youth
St. Ivana Mazepy, 13, Kyiv, 01010, Ukraine

Oksana BONDARENKO
Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine
St. Vasylkivska, 31/17, Kyiv, 03122, Ukraine
Kyiv Palace of Children and Youth
St. Ivana Mazepy, 13, Kyiv, 01010, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-6859-7136

Abstract

The work investigated the state of winter wheat seedlings under conditions of high content of heavy metal zinc in the cultivation medium. Morphometric analysis of 35-day-old seedlings was carried out and the state of the photosynthetic apparatus of leaves was determined by the content of chlorophyll and carotenoids. Excess zinc causes a stress reaction in plants, the manifestations of which are an increase in the content of protective pigments and a decrease in light absorption and electron transport due to the destruction of LHC 2. A decrease in photosynthetic activity is the cause (or consequence) of a significant decrease in plant growth processes. This may predict a decrease in the yield of grain crops, in particular wheat in these areas. Therefore, before resuming agronomic activity, the soils urgently need to be cleaned.

Key words: Triticum aestivum L., winter wheat, heavy metals, photosynthetic apparatus, chlorophyll, carotenoids.

Секція. 2
ТЕХНОЕКОЛОГІЯ

Section 2.
TECHNICAL ECOLOGY

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330385

DEPLETED URANIUM AMMUNITION USE IN MODERN WARFARE – A CONCERN FOR ENVIRONMENT POLLUTION?

Lauris ARBIDANS
University of Latvia
Raina Blvd. 19, Riga, LV 1586, Latvia
e-mail: lauris.arbidans@lu.lv

Abstract

This literature mini-review explores the environmental and health impacts of depleted uranium (DU) ammunition. DU, a byproduct of uranium enrichment, is used in armor-piercing munitions due to its high density and pyrophradooric properties. Upon impact, DU munitions release fine particles and fragments that contaminate soil, air, and water. These contaminants persist in the environment and may undergo complex chemical transformations. Human exposure occurs primarily through inhalation, ingestion, and embedded fragments, leading to the accumulation of uranium in organs like the kidneys, bones, and liver. Health concerns include nephrotoxicity, potential carcinogenicity, and neurological and reproductive effects, though evidence from human studies remains mixed. Studies of Gulf War veterans with DU exposure report ongoing excretion of uranium but limited clinically significant health effects. The review also addresses the environmental risks of depleted uranium use of ongoing Russo-Ukrainian war.

Key words: *depleted uranium, pollution, heavy metals, soil contamination, uranium rounds, Russo-Ukrainian war.*

Depleted uranium (DU) is a byproduct of the uranium enrichment process [1]. This process is primarily used to produce enriched uranium for nuclear reactors and weapons. During enrichment, the concentration of the uranium-235 isotope is increased, leaving behind a residual material that is depleted in this isotope. Consequently, DU primarily consists of uranium-238, with a significantly reduced concentration of the uranium-235 isotope compared to natural uranium [2]. Militarily, DU is primarily used in armor-piercing ammunition and tank armor, also used in ongoing Russo-Ukrainian war [3]. The high density and self-sharpening properties of DU make it exceptionally effective at penetrating armored targets. [4]. When DU munitions strike hard targets, they generate fine particles of DU dust that can disperse into the environment, contaminating soil, water, and air. The long-term behavior of these particles, including their rate of corrosion, transport mechanisms, and potential for bioaccumulation, is not fully understood. There are also concerns about potential health problems in exposed populations, including veterans and civilians [4], [5]. Exposure to DU can occur through inhalation, ingestion, or wound contamination. The potential health effects of DU exposure include kidney damage, respiratory problems, neurological effects, and an increased risk of cancer. The combination of environmental contamination and potential health risks has made DU a controversial topic in military and public health discussions.

The size of these particles can range from a few nanometers to several micrometers, making them easily dispersible by wind and other environmental factors. DU can also be released as large fragments and chemically unchanged oxides [6]. In some cases, DU munitions may not fully fragment upon impact, resulting in the release of large DU fragments into the environment. These fragments can corrode over time, releasing uranium oxides and other chemical compounds into the surrounding soil and water. The combination of DU dust, fragments, and oxides contributes to a complex pattern of environmental contamination in areas where DU munitions have been used.

Inhalation of DU dust is a major route of exposure, particularly in areas where DU munitions have been used [4], [7], [8]. The fine particles of DU dust generated during the impact of DU munitions can become suspended in the air and inhaled by individuals in the vicinity. The risk of inhalation exposure is particularly high in the immediate aftermath of DU munition use, when dust concentrations are at their peak. Resuspension of DU-containing particles can occur if the particle size is sufficiently small [4]. DU particles that have settled on the ground can be resuspended into the air by wind, vehicle traffic, or human activities. This resuspension can lead to prolonged inhalation exposure, even long after the initial DU release. Inhaled DU dust may lead to protracted exposure of the lungs and other organs. Once inhaled, DU particles can deposit in the respiratory tract, where they may persist for extended periods. The slow clearance of DU particles from the lungs can result in chronic exposure of the lung tissue and other organs to both the chemical and radiological toxicity of uranium. The potential health effects of inhalation exposure include respiratory irritation, lung damage, and an increased risk of lung cancer [4].

Ingestion of DU particles is another potential route of exposure, especially for individuals living in contaminated areas [7]. DU particles can be ingested through various pathways, including contaminated food, water, and soil. Hand-to-mouth activity can contribute to ingestion, particularly for children who may inadvertently ingest DU-contaminated soil or dust [6]. Children are more vulnerable to ingestion exposure due to their tendency to put their hands and other objects in their mouths. Transfer of DU to drinking water or locally produced food has limited potential to lead to significant exposure [4]. While DU can contaminate water and soil, the low solubility of DU and the natural processes of dilution and filtration tend to limit the extent of contamination in drinking water and food. However, in areas with high levels of DU contamination, the potential for ingestion exposure should not be disregarded. The potential health effects of ingestion exposure include gastrointestinal irritation, kidney damage, and other systemic effects, although the risks are very low.

The Baltimore Veterans Affairs (VA) DU Follow-Up Program, initiated in 1993, carefully monitors health effects stemming from DU exposure in Gulf War veterans [9]. This program is one of the most comprehensive efforts to assess the long-term health consequences of DU exposure in humans. Biennial surveillance visits provide detailed health assessments. These assessments include physical examinations, laboratory tests, and neurocognitive evaluations, allowing researchers to track the health status of DU-exposed veterans over time. The data collected through the Baltimore VA DU Follow-Up Program have provided valuable insights into the potential health effects of DU exposure.

Soldiers with embedded DU fragments continue to excrete elevated concentrations of uranium in their urine [9]. This indicates that the DU fragments are slowly corroding and releasing uranium into the body, leading to chronic exposure. With the exception of elevated urine U excretion, no clinically significant expected U-related health effects have been identified to date. This suggests that the levels of DU exposure in Gulf War veterans may not be high enough to cause significant health problems.

Cost-effective remediation approaches are critical for addressing widespread contamination. Recent concerns over potential human exposure to DU primarily have resulted in research into numerous innovative remediation technologies. Developing methods and processes for estimating the

life cycle costs of implementing these various techniques is important in identifying cost-effective solutions [10].

Physical removal involves the excavation and disposal of DU-contaminated soil. This method is most suitable when uranium is concentrated in well-defined areas, such as firing ranges, weapons testing sites, or battle impact zones. By physically extracting the contaminated material, immediate risk reduction can be achieved. Soil washing is a chemical and physical process designed to leach uranium from soil particles using water or specialized chemical solutions. After excavation, the soil is processed through washing units that separate contaminants. The cleaned soil can often be returned to the site, while the wash water undergoes further treatment [10].

Chemical stabilization (immobilization) involves adding chemical agents to contaminated soils to bind uranium into stable, insoluble forms. The objective is not to remove uranium, but to reduce its mobility and bioavailability, thereby minimizing environmental and health risks. Common stabilizing agents include hydroxyapatites and clay minerals. Another prospective method could be phytoremediation, which uses plants to extract or stabilize uranium in the soil [11].

Nevertheless, it is crucial to maintain monitoring in potentially contaminated sites, including gamma ray emission surveys, soil sampling and uranium speciation.

Conclusions

The use of depleted uranium ammunition presents significant concerns for both environmental contamination and potential human health impacts. While DU offers clear tactical advantages in modern warfare due to its density and armor-piercing capabilities, its deployment leaves behind persistent environmental residues - ranging from fine aerosols to solid fragments that can contaminate air, soil, and water. Human exposure primarily occurs through inhalation, ingestion, or embedded fragments, each carrying distinct risks.

Although long-term studies, such as the Baltimore VA DU Follow-Up Program, have not conclusively linked DU exposure to major health effects in veterans, the chronic excretion of uranium and its bioaccumulation in organs call for continued vigilance. Moreover, the full environmental consequences of DU contamination remain incompletely understood, particularly in active conflict zones such as Ukraine.

Remediation efforts, including physical removal, chemical stabilization, and phytoremediation, offer promising strategies to mitigate DU's environmental footprint. However, these solutions require careful implementation, cost analysis, and long-term monitoring. Given the dual threats of chemical toxicity and radiological exposure, future use of DU munitions should be guided by precautionary principles, robust environmental assessments, and international discourse on the ethics and safety of such materials in warfare.

References

1. Katz, S. A. The Chemistry and Toxicology of Depleted Uranium. *Toxics* **2014**, *2*(1), 50-78. https://doi.org/10.3390/toxics2010050

2. Kazery, J. A.; Proctor, G.; Larson, S.L.; Ballard, J.H.; Knotek-Smith, H.M.; Zhang, Q.; Celik, A.; Dasari, S.; Islam, S. M.; Tchounwou, P. B.; Han, F. X. Distribution and Fractionation of Uranium in Weapon Tested Range Soils. *ACS Earth and Space Chemistry* **2021**, 5, 2, 356-364. https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00326

3. Gozzi, L. Ukraine war: UK defends sending depleted uranium shells after Putin warning. *BBC*, 31.03.2023. https://www.bbc.com/news/world-europe-65032671. (accessed on 20.05.2025).

4. Bleise, A.; Danesi, P. R.; Burkart, W. Properties, use and health effects of depleted uranium (DU): a general overview. *Journal of Environmental Radioactivity* **2003**, vol 64, pp. 93-112. https://doi.org/10.1016/s0265-931x(02)00041-3

5. Faa, A.; Gerosa, C.; Fanni, D.; Floris, G.; Eyken, P. V.; Lachowicz, J. I.; Nurchi, V. M. Depleted Uranium and Human Health. *Current Medicial Chemistry* **2018**, vol. 25, pp 49-64. https://doi.org/10.2174/0929867324666170426102343

6. Briner, W. E. The Evolution of Depleted Uranium as an Environmental Risk Factor: Lessons from Other Metals. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2006**, *3*(2), 129-135. https://doi.org/10.3390/ijerph2006030016

7. Hon, Z.; Österreicher, J.; Navratil, L. Depleted Uranium and Its Effects on Humans. *Sustainability* **2015**, *7*(4), 4063-4077. https://doi.org/10.3390/su7044063

8. Zhang, L.; Chu, J.; Xia, B.; Xiong, Z.; Zhang, S.; Tang, W. Health Effects of Particulate *Toxics* **2022**, *10*(10), 575. https://doi.org/10.3390/toxics10100575

9. Squibb, K.S.; McDiarmid, M.A. Depleted uranium exposure and health effects in Gulf War veterans. Philosophical Transactions of the Royal Society B **2006**. https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1823

10. Boyd, P. Toward Remediation Economics: Use and Development of Life Cycle Cost - Benefit Analysis. Thesis for Master's degree, University of Toronto, Canada **2018**. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34630.19523

11. International Atomic Energy Agency. Remediation of Sites with Dispersed Radioactive contamination. Technical reports series no. 424, 2004. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS424_web.pdf. (accessed on 19.05.2025).

ВИКОРИСТАННЯ БОЄПРИПАСІВ ІЗ ЗБІДНЕНИМ УРАНОМ У СУЧАСНИХ ВІЙНАХ — ЗАГРОЗА ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ?

Лауріс АРБІДАНС
Латвійський університет
Raina Blvd. 19, Riga, LV 1586, Латвія
https://orcid.org/0000-0002-5281-5485

Анотація

Цей короткий огляд літератури присвячений вивченню впливу збідненого урану (ЗУ) на довкілля та здоров'я людини. ЗУ, побічний продукт збагачення урану, використовується у бронебійних боєприпасах завдяки своїй високій щільності та піроформним властивостям. Під час удару такі боєприпаси утворюють дрібнодисперсні частинки й уламки, які забруднюють ґрунт, повітря та воду. Ці забруднювачі можуть тривалий час зберігатися в навколишньому середовищі й зазнавати складних хімічних перетворень. Людина зазнає впливу ЗУ переважно через вдихання, заковтування чи внаслідок влучення уламків у тіло, що призводить до накопичення урану в органах, зокрема в нирках, кістках та печінці. Серед потенційних ризиків для здоров'я – нефротоксичність, можливий канцерогенний вплив, а також неврологічні та репродуктивні порушення, хоча дані досліджень на людях є суперечливими. У дослідженнях серед ветеранів війни в Перській затоці, які зазнали впливу ЗУ, фіксується тривале виведення урану з організму, але відсутні суттєві клінічно значущі наслідки для здоров'я. Огляд також розглядає екологічні ризики, пов'язані з використанням збідненого урану в умовах триваючої російсько-української війни.

Ключові слова: збіднений уран, забруднення, важкі метали, забруднення ґрунту, уранові, боєприпаси, російсько-українська війна.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332100

INTEGRATED METHODOLOGY FOR TRACING OIL SLICKS USING SENTINEL-1 AND SENTINEL-2 DATA: BACKWARD MODELLING, METEOROLOGICAL CORRECTION, AND VISUALIZATION ANALYSIS

Vladyslav BALINSKYY[1], Ruslan HAVRYLIUK[1,2], Vitalii HULEVETS[1,3], Mihaela TIMOFTI[4]
[1] *National Ecological Centre of Ukraine*
7-9, Symona Petliury str., office 63, Kyiv, 01032, Ukraine
[2] *Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine*
55B, Olesia Honchara str., Kyiv, 01054, Ukraine
[3] *Interregional Academy of Personnel Management*
2, Frometivska str., Kyiv, 03039, Ukraine
Dunarea de Jos University of Galati
47 Domneasca Street, Galati 800008, Romania
e-mail: v.balinsky@gw.necu.org.ua

Abstract

Modern satellite systems such as Sentinel-1 (SAR) and Sentinel-2 (optical spectrum) offer valuable tools for detecting the spatial morphology of marine pollution, including dark cores on SAR images that indicate thin surface films or emulsified oil layers. Unlike traditional spill detection, locating the underwater pollution source requires backward trajectory analysis accounting for wind and hydrodynamic conditions. This study presents an integrated methodology for backward tracing of oil slicks, combining satellite image analysis, vertical particle rise modeling, and drift vector correction using Meteoblue data. Special attention is given to the comparative evaluation of EO Browser visualization scripts used to enhance the detection of surface films and improve signal-to-noise ratios on Sentinel-1 and Sentinel-2 images. The method was tested using the case of the "Volgoneft" tanker incident in the northwestern Black Sea (December 2024). The results demonstrate the applicability of this approach for operational source localization under conditions of limited visibility, complex geopolitics, or military conflict.

Key words: *oil spill, marine area, environmental monitoring, Sentinel-1, Sentinel-2, SAR imagery, dark core, drift modeling, meteocorrection, remote sensing.*

Introduction

Modern satellite observation systems, such as Sentinel-1 (SAR) and Sentinel-2 (optical spectrum), enable the detection of the spatial morphology of pollution, particularly the presence of dark core areas in radar imagery, which indicate thin oil films or emulsified inclusions. However, unlike classical slick detection, identifying the coordinates of an underwater spill source requires a backward analysis of the slick's trajectory, taking into account wind and hydrodynamic conditions [3, 4].

This study presents an integrated methodology for the backward tracing of fuel oil slicks, combining satellite image analysis, vertical particle ascent modelling, and meteorological correction of the drift vector using Meteoblue data [7]. Special attention is given to the comparative assessment of the effectiveness of visualization scripts in EO Browser, which are used to enhance the detection of film formations and improve the signal-to-noise ratio in Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery [8]. The methodology was tested using the case of the "Volgoneft" tanker accident in the northwestern part of the Black Sea (December 2024).

The proposed approach is suitable for use in environmental monitoring systems under conditions of limited visibility, complex geopolitical circumstances, or military conflict, where the rapid localization of a pollution source is of critical importance [6].

Materials and Methods

Sentinel-1 radar images (IW mode, VV+VH polarization, spatial resolution ~5 m × 20 m) were processed using EO Browser (Sentinel Hub). Sentinel-2 optical images (processing level L2A, resolution 10 m/pixel) were used for verification. Georeferencing of debris and contaminated zones was performed manually using Google Earth Pro (coordinate anchoring) and Umap (for building an interactive map), which enabled visualization of the drift zones and construction of the tracing model. To account for the influence of atmospheric conditions and underwater currents, archived meteorological data from Meteoblue (wind fields, currents, turbulence) were additionally used for drift direction correction and source coordinate estimation.

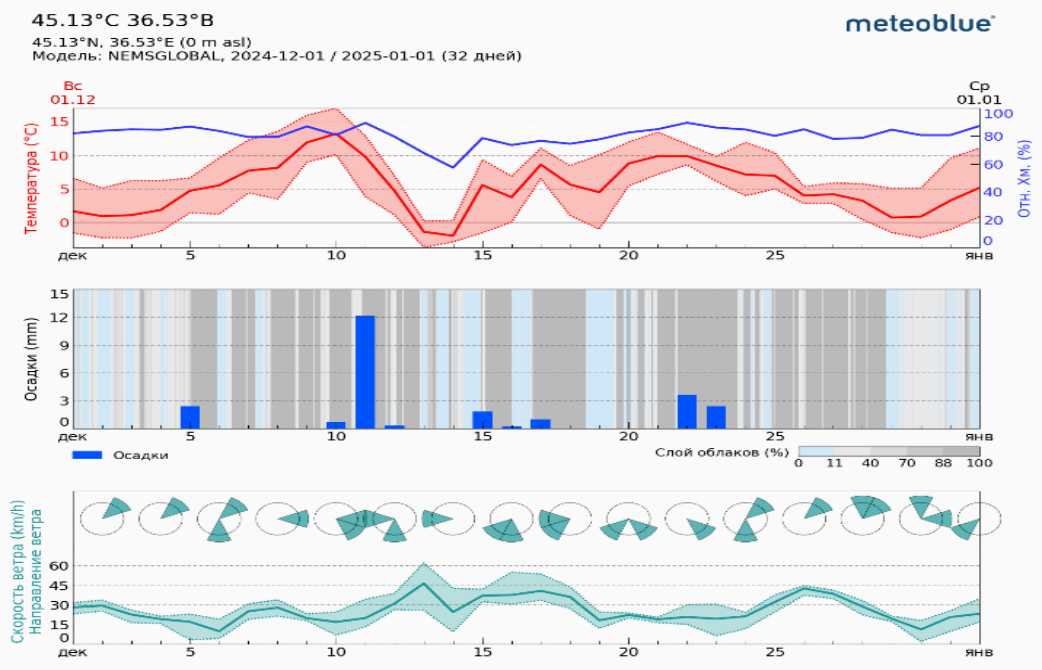


Fig 1. *Archived meteorological data from Meteoblue (45.13°N, 36.53°E) for the period from December 1, 2024, to January 1, 2025, were analyzed*

The chart displays daily averages of temperature, cloud cover, precipitation, wind direction, and wind speed. Weather conditions throughout December 2024 were consistently cloudy, with variable wind directions and short periods of calm. These data were used for meteorological correction of the dark core drift model.

To improve the accuracy of detecting film slicks and dark core areas, the effectiveness of EO Browser scripts was analyzed. For Sentinel-1, 18 scripts were tested, including customized variants with modified display channels. The highest performance was demonstrated by the script VV - Linear Gamma0 – 50% green. For Sentinel-2, indices such as NDWI, SWIR, False Color Urban, and others were evaluated—these proved most suitable for verifying surface objects and pollution boundaries.

The methodology is based on detecting dark core areas—stable zones of SAR signal absorption, which are interpreted as surface markers of underwater leakage [1].

The displacement of the slick head was calculated based on the coordinates of the dark core center and the direction of the submarine current (Figure 1):

$$Lh=(h\times vh)/wr, \quad (1)$$

where: *Lh* — horizontal displacement magnitude (m), *h* — source depth (m), *vh* — horizontal current velocity (m/s), wr — particle rise velocity (m/s) [2].

The location of the source was determined using the following formula:

$$P_source=P_head-Lh\times dir, \quad (2)$$

where: *P_source* — calculated coordinates of the source, *P_head* — coordinates of the dark core (determined from SAR), *dir* — normalized vector of horizontal current direction [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

A morphological analysis of the slick (tapering pattern) was then performed, followed by backward tracing to the dark core, correction using archived meteorological data (Meteoblue), and verification with Sentinel-2 optical imagery (presence of signal buoys, debris) (Figure 2). A complicating factor is the potential coalescence of slicks from multiple sources, which is considered as a morphological indicator.

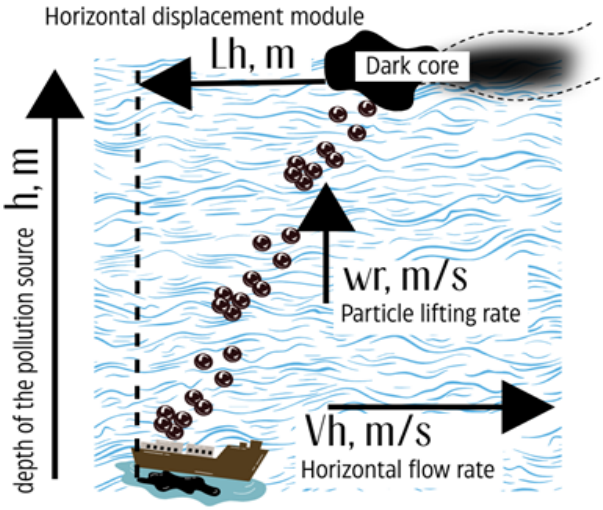


Fig. 2. *Scheme of dark core displacement relative to the underwater pollution source under the influence of the current*

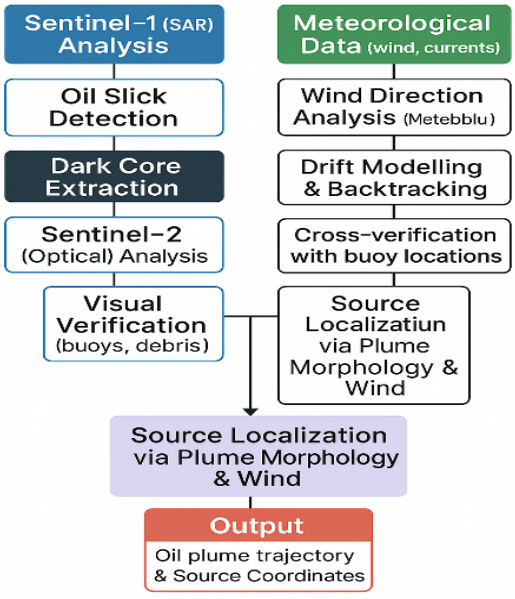


Fig. 3. *Block diagram of the integrated methodology for tracing an oil slick*

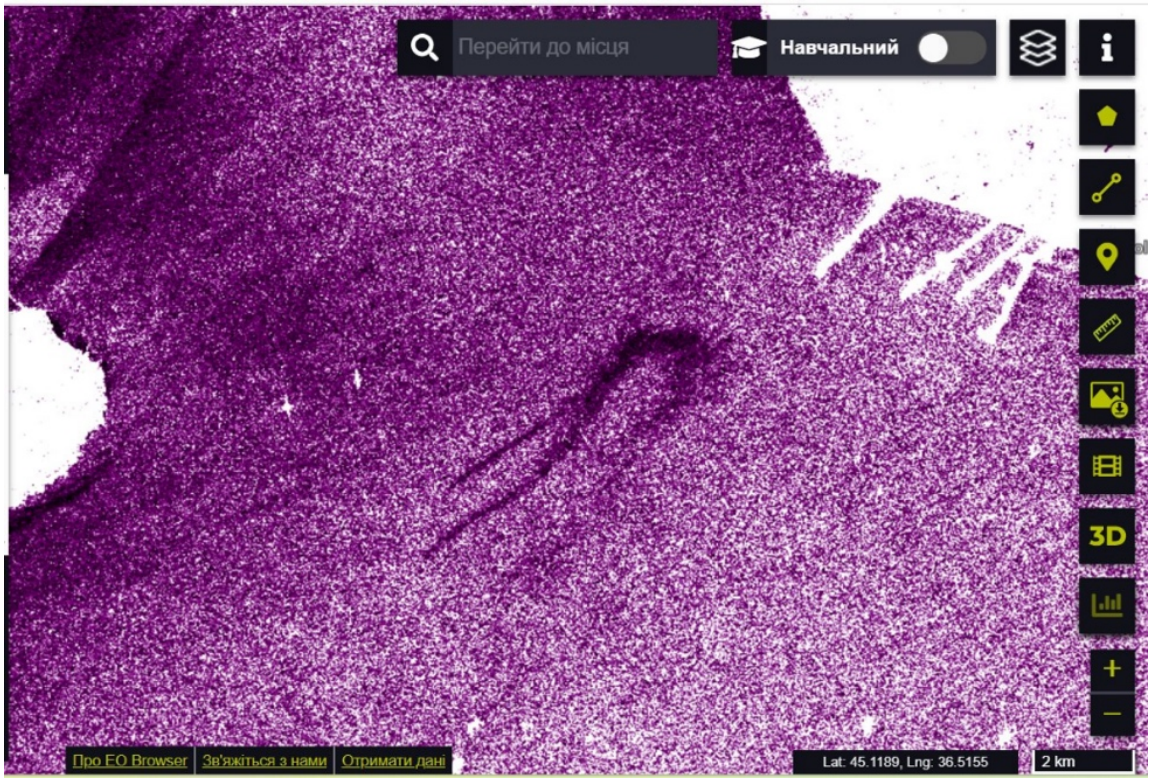


Fig. 4. *SAR visualization of the fuel oil slick using the script VV - Linear Gamma0 – 50% green (Sentinel-1, March 13, 2025)*

The dark core on Fig.4 is clearly distinguishable against the water surface due to reduced surface roughness. Manual attenuation of the green channel enhances the signal-to-noise ratio without compromising the slick's morphology.

Results

Sentinel-1: Evaluation of EO Browser Script Effectiveness. A total of 18 EO Browser scripts were tested for visualizing fuel oil slicks in Sentinel-1 SAR imagery. The focus was placed on VV polarization mode, as it is the most sensitive to changes in water surface micro-roughness.

The highest effectiveness was demonstrated by the script VV - Linear Gamma0 – 50% green, in which the green channel is attenuated to reduce background noise. This script provided the best signal-to-noise ratio and clear delineation of the dark core and film slick boundaries across a wide range of contrast settings.

Other highly effective scripts included:

- VV - Gamma0 (decibels) — a basic high-contrast SAR visualization option;
- SAR Urban — provides colored display of slicks and surface objects (e.g., buoys, debris) against the water background.

Scripts that used VH polarization or were designed for land-based objects did not yield high-quality results under conditions of film pollution. Some scripts were technically unsuitable due to EO Browser code size limitations.

The evaluation was based on the following criteria: contrast of the dark core, noise resistance, boundary detail of the oil film.

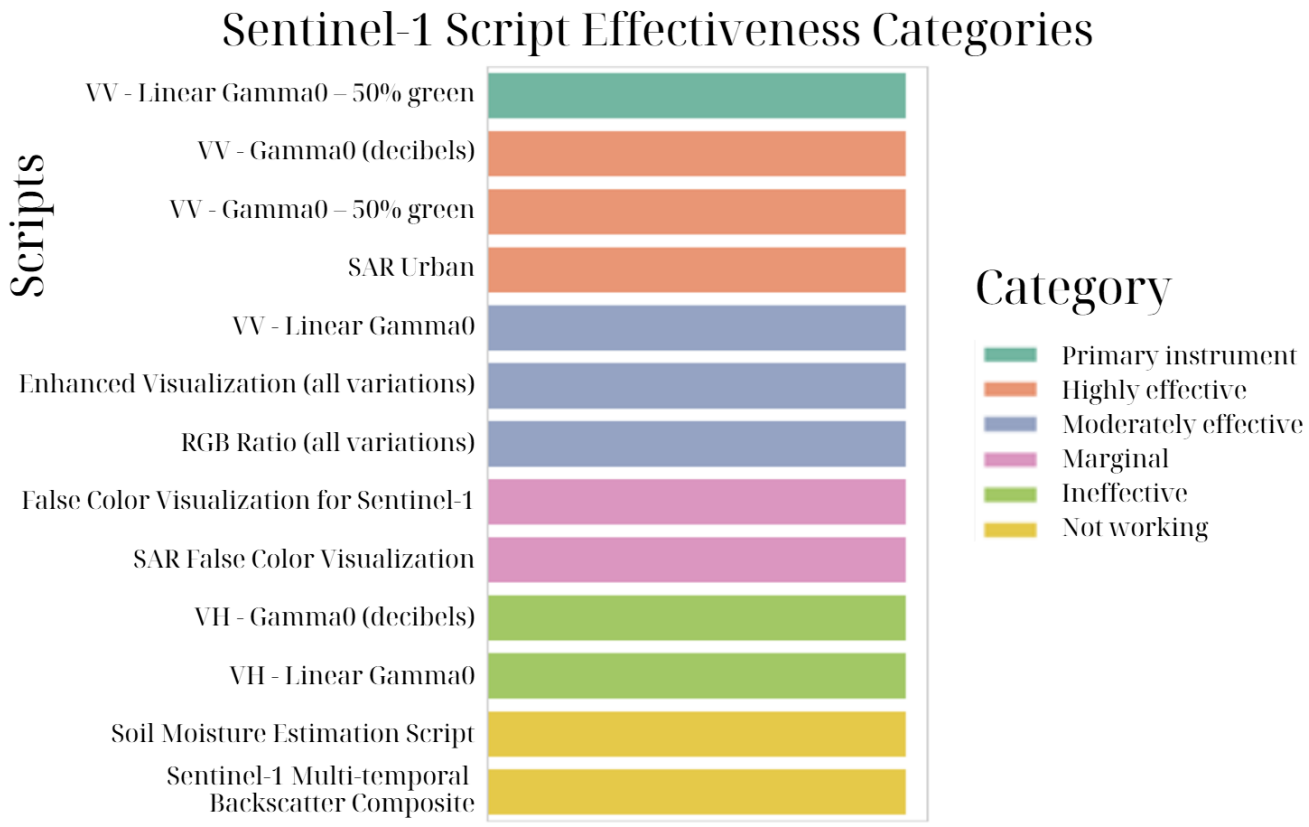


Fig. 5. *Categories of EO Browser script effectiveness for Sentinel-1 in visualizing fuel oil slicks*

The classification was based on the quality of dark core detection, contour clarity of film slicks, and signal-to-noise ratio in Sentinel-1 SAR images (VV/VH).

Sentinel-2: evaluation of EO Browser script effectiveness. To visualize film-like fuel oil pollution in Sentinel-2 optical imagery, 10 EO Browser scripts were tested, utilizing visible, near-infrared, and SWIR bands. The focus was placed on the NDWI index, SWIR composites, and Urban Color visualizations. The best results were shown by:

– NDWI — enabled clear delineation of the slick boundary up to 7.4 km from the debris under good lighting conditions;

– SWIR (Shortwave Infrared) — enhanced contrast between oil films and the water surface;

– False Color Urban — provided the most intuitive interpretation of surface objects, particularly debris and buoys.

A significant number of scripts required manual adjustment of the sensitivity threshold due to the relatively low dynamic range of the reflected signal. It was also found that during the winter-spring period, Sentinel-2 is limited in the number of high-quality images due to cloud cover, especially in the case of thin oil films.

The evaluation was based on the following criteria: visibility of slick boundaries, detail of surface objects, and stability of results under varying atmospheric conditions.

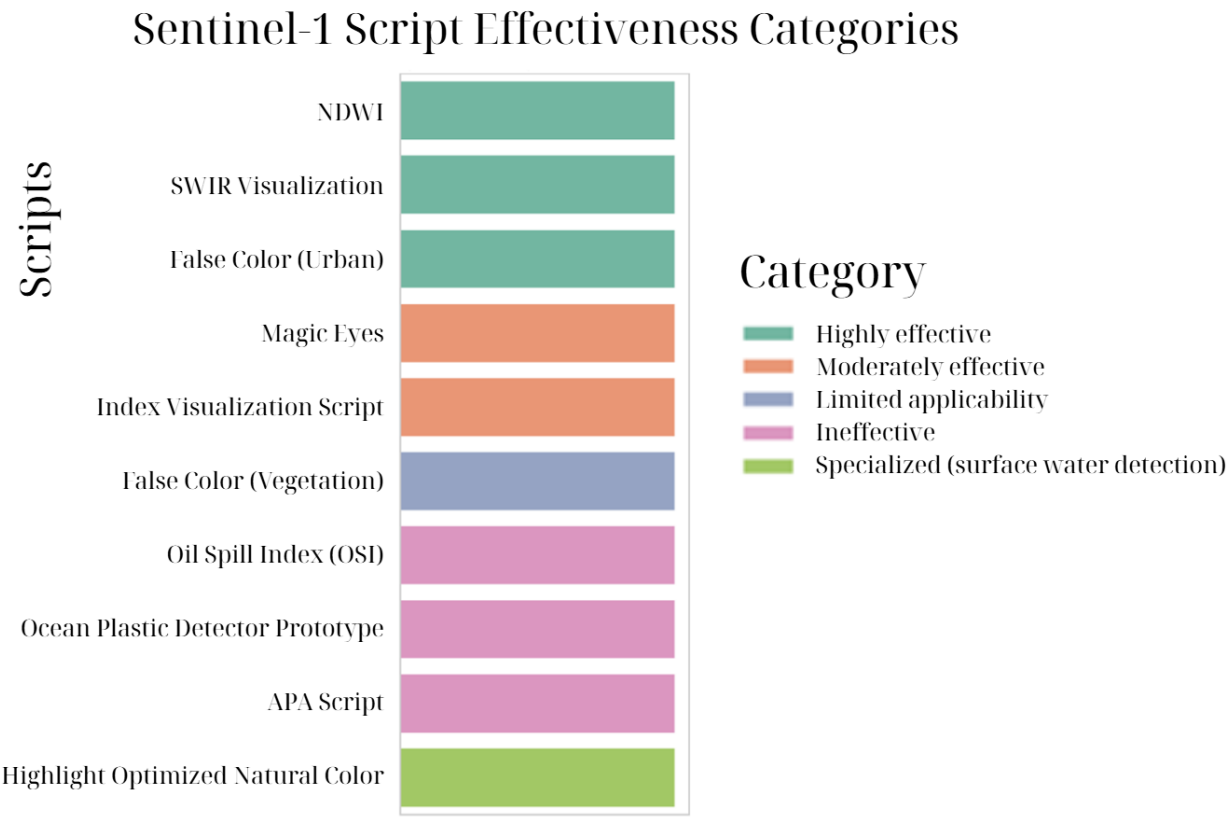


Fig. 6. *Categories of EO Browser script effectiveness for Sentinel-2 in visualizing fuel oil pollution*

The classification was based on the quality of slick boundary detail, the ability to identify surface objects, and the stability of results in Sentinel-2 optical imagery (L2A, 10 m/pixel).

Comparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 platforms. A comparative analysis showed that Sentinel-1 radar imagery provides significantly higher effectiveness in detecting extended fuel oil slicks, particularly dark core areas. It was observed that the slick boundary could be traced on SAR images at a distance of over 14.8 km from the debris, whereas on the best available Sentinel-2 optical image, this boundary was limited to approximately 7.4 km.

Additionally, during the winter-spring period, Sentinel-1 provided at least twice as many images suitable for analysis, as it is not affected by cloud cover. This ensured stable retrospective monitoring.

Sentinel-2 optical imagery proved valuable for verifying surface objects—such as debris, buoys, and localized emulsified accumulations. NDWI and SWIR composites were particularly informative. However, their high dependence on weather conditions limited their practical utility for tracing in crisis situations.

Thus, Sentinel-1 should be considered the primary platform for backward slick tracing, while Sentinel-2 serves as a complementary source for confirming pollution morphology when high-quality images are available.

The comparison results served as the basis for the practical application of the methodology during the analysis of the "Volgoneft-212/239" tanker accident, which made it possible to:

- localize the underwater spill sources;
- determine coordinates with an estimated accuracy of 40–150 meters, depending on the depth of the source, the speed of underwater currents, and the quality of SAR georeferencing [3] (Table 1);

– build an interactive map of debris and slick drift; detect film slicks up to 20 km in length; confirm the effectiveness of the dark core displacement model combined with meteorological correction [4].

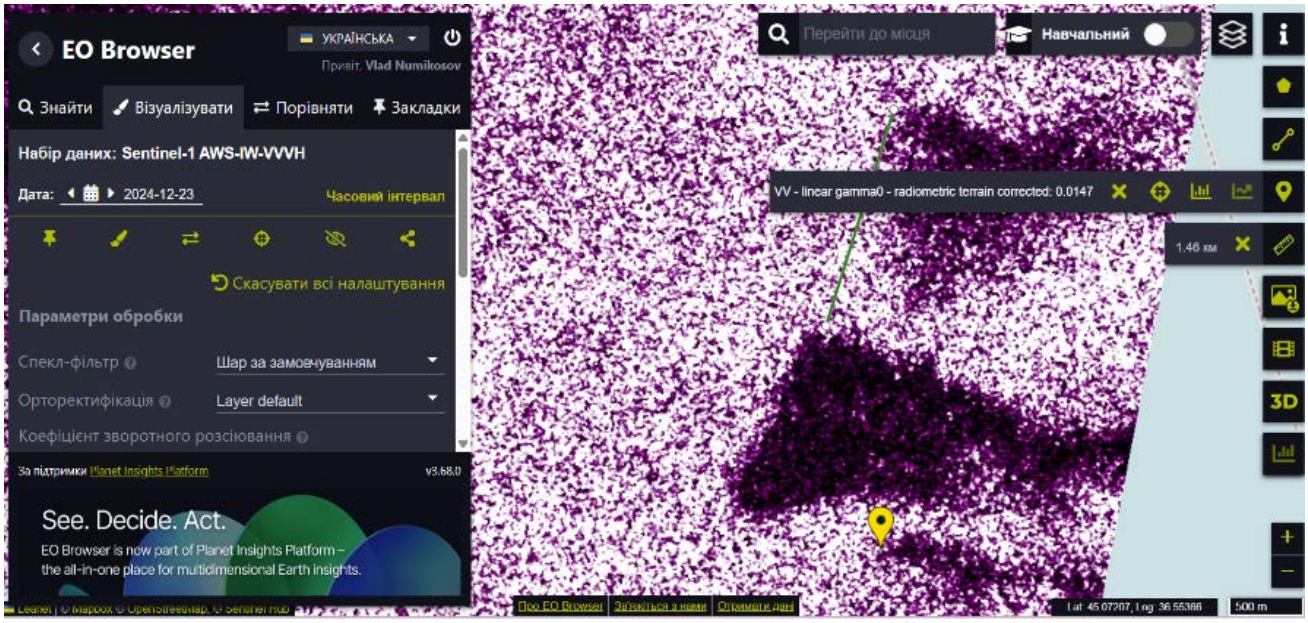


***Fig. 7**. Localization of submarine spill sources based on the stable dark core zone in the Sentinel-1 SAR image (VV, 23.12.2024): 1-Lat: 45.05928, Long: 36.53598; 2-Lat: 45.07207, Long: 36.53134; 3-Lat: 45.08449, Long: 36.53701*

Table 1. Coordinates of submarine spill sources

Sentinel-1 AWS-IW-VV+VH (coordinate system: WGS-84)			
	Spill source ID	**Latitude, B**	**Longitude, L**
As of 18.12.2024:	1.	45.05916	36.53761
	2.	45.07224	36.53143
As of 23.12.2024:	1.	45.05928	36.53598
	2.	45.07207	36.53134
	3.	45.08449	36.53701
As of 31.12.2024:	2.	45.07200	36.53139
	3.	45.08459	36.53751

The evaluation of the effectiveness of backward slick tracing confirms the reliability of SAR-based identification of dark cores as stable markers of submarine spills, even under complex hydrodynamic conditions [1]. The modeling results and observations are consistent with the findings described in the works of Fingas [5], which emphasize the importance of accounting for the vertical ascent of emulsified particles and the influence of weather conditions on the formation of surface oil slicks.

Conclusions

The proposed methodology for backward tracing of fuel oil slicks based on Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite imagery enabled the identification of underwater spill source coordinates with

high accuracy—within 40–150 meters, depending on the quality of input data and meteorological conditions. The algorithm is based on SAR analysis of the spatial morphology of the dark core, drift direction correction using meteorological models, and optical verification of surface objects [2, 4].

The methodology proves effective in situations where physical access to the disaster site is limited or impossible. It enables stable retrospective monitoring, localization of environmental impact, and support for an evidence base in the context of military or technological conflict. The use of such approaches is recommended for monitoring underwater spills in crisis regions, including areas affected by armed conflict.

This research is part of the project ***`Innovative sediment management framework for a SUstainNable DANube black Sea system (SUNDANSE)'****, co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.*

References

1. Liu D., Li M., Wu L., et al. An innovative coupling technique for integrating oil spill prediction model with finite volume method-based ocean model. Marine Pollution Bulletin. 2022. V.185. P.114–242. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114242
2. Haibo C., Wei Y., Yuan L. Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout. Ocean Engineering. 2015. V.110. P.227–243. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.025
3. Wang Z., Fingas M. Development of oil hydrocarbon fingerprinting and identification techniques. Marine Pollution Bulletin. 2003. V.47(9–12). P.423–452. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00215-7
4. Röhrs J. et al. The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills. Ocean Science. 2018. V.14. P.1581–1601. https://doi.org/10.5194/os-14-1581-2018
5. Fingas M. Oil Spill Science and Technology. Elsevier Inc., 2011. https://doi.org/10.1016/C2009-0-19703-9
6. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Pollution Events in the EU. EMSA, 2022.
7. Meteoblue AG. Weather and Ocean Current Archives. https://www.meteoblue.com
8. EO Browser (Sentinel Hub). Custom Visualization Scripts Repository. https://custom-scripts.sentinel-hub.com

ІНТЕГРОВАНА МЕТОДИКА ТРАСУВАННЯ НАФТОВИХ ШЛЕЙФІВ ЗА ДАНИМИ SENTINEL-1 ТА SENTINEL-2: ЗВОРОТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТЕОКОРЕКЦІЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ

Владислав БАЛІНСЬКИЙ
Національний екологічний центр України
вул. Симона Петлюри, 7-9, офіс 63, м. Київ, 01032, Україна
https://orcid.org/0009-0007-5036-7897

Руслан ГАВРИЛЮК
Національний екологічний центр України
вул. Симона Петлюри, 7-9, офіс 63, м. Київ, 01032, Україна
Інститут геологічних наук Національної академії наук України
вул. Олеся Гончара, 55Б, м. Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6465-9440

Віталій ГУЛЕВЕЦЬ
Національний екологічний центр України
вул. Симона Петлюри, 7-9, офіс 63, м. Київ, 01032, Україна
Міжрегіональна академія управління персоналом
вул. Фрометівська, 2, м. Київ, 03039, Україна
https://orcid.org/0009-0002-6311-6652

Міхаела ТІМОФТІ
Університет Нижнього Дунаю у м. Галац
47 Domneasca Street, Galati 800008, Румунія
https://orcid.org/0000-0003-2876-9500

Анотація

Сучасні супутникові системи, такі як Sentinel-1 (радар з синтезованою апертурою, SAR) і Sentinel-2 (оптичний спектр), надають цінні інструменти для виявлення просторової морфології морських забруднень, зокрема темних зон на зображеннях SAR, що вказують на тонкі поверхневі плівки або емульговані шари нафтопродуктів. На відміну від традиційного виявлення розливів, локалізація підводного джерела забруднення вимагає зворотного аналізу траєкторій з урахуванням вітрових та гідродинамічних умов. У цьому дослідженні представлено інтегровану методику зворотного трасування нафтових шлейфів, що поєднує аналіз супутникових знімків, моделювання вертикального підйому частинок та корекцію вектора дрейфу на основі даних Meteoblue. Особливу увагу приділено порівняльній оцінці скриптів візуалізації EO Browser, які використовуються для покращення виявлення поверхневих плівок і підвищення співвідношення сигнал/шум на знімках Sentinel-1 та Sentinel-2. Методика була протестована на прикладі інциденту з танкером «Волгонєфть» у північно-західній частині Чорного моря (грудень 2024 року). Результати демонструють придатність цього підходу для оперативної локалізації джерел забруднення в умовах обмеженої видимості, складної геополітичної ситуації або воєнного конфлікту.

Ключові слова: розлив нафти, морська акваторія, екологічний моніторинг, Sentinel-1, Sentinel-2, зображення з радаром синтезованої апертури (SAR), темна зона, моделювання дрейфу, метеокорекція, дистанційне зондування Землі.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.327366

TIME-SERIES ANALYSIS-BASED QUALITY MONITORING OF WATER, DISINFECTED WITH CHLORINE DIOXIDE

Oleksandr BONDARCHUK[1], Arcady SHAKHNOVSKY[1], Larysa SPASONOVA[1], Andrii MOKIIENKO[2], Roman BOCHENEK[3]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
[2]*National University "Ostroh Academy"*
str. Seminarska, 2, Ostroh, 35800, Ukraine
[3]*Rzeszów University of Technology*
al. Powstańców Warszawy 12, Rzeszów, 35-959, Poland
e-mail: Bondarchukau@gmail.com

Abstract

In wartime and post-war recovery conditions, the sustainable management of urban water resources has emerged as a critical priority in the context of global environmental challenges and public health demands. Among various disinfection methods, chlorine dioxide is increasingly recognized for its high efficacy in microbial control and lower potential for producing hazardous disinfection by-products compared to traditional chlorination. However, to ensure the reliability, safety, and environmental compliance of such systems, it is essential to employ rigorous analytical frameworks that can assess and predict system performance under variable conditions.

This study focuses on the mathematical analysis of chlorine dioxide-based water purification systems, using monitoring data from a Dniprovska municipal water treatment station in Kyiv, Ukraine. The integration of mathematical modeling with real-time water quality monitoring offers a robust approach to optimizing operational parameters, identifying anomalies, and improving overall treatment efficiency. Importantly, this research contributes to broader ecological objectives by supporting the reduction of chemical usage and minimizing environmental impact. Moreover, it aligns with the principles of sustainable development, particularly in enhancing the resilience of water infrastructure and advancing progress toward the United Nations Sustainable Development Goals. Monitoring of the selected set of water quality parameters over a two-year period revealed the expected average values and ranges for each of the investigated indicators. As the analysis showed, the drinking water complied with regulatory standards even under conditions of anomalous contamination of river water, which confirms both the effectiveness of the implemented technological solutions and the operational efficiency of the adopted treatment technology.

Keywords*: natural water treatment, water treatment plant, disinfection, chlorine dioxide, monitoring, statistical analysis, sustainable development goals.*

The provision of safe and clean drinking water remains one of the most pressing global challenges, particularly in the face of rapid urbanization, climate change, and the degradation of natural water sources. Ensuring the microbiological safety of drinking water while minimizing the formation of harmful disinfection by-products has driven the development and implementation of advanced treatment technologies. Among these, chlorine dioxide has gained increasing attention due to its strong oxidizing properties, broad-spectrum antimicrobial activity, and relatively low tendency to form trihalomethanes and other regulated by-products when compared to traditional chlorination methods [1, 2].

In the context of Ukraine, where municipal water treatment systems often operate under conditions of limited resources and outdated infrastructure, the adoption of chlorine dioxide as a primary or supplementary disinfectant is viewed as a promising strategy for improving water quality and operational efficiency. Nevertheless, the performance of chlorine dioxide-based disinfection systems is highly sensitive to multiple factors, including dosage accuracy, contact time, water temperature, and the presence of organic and inorganic substances in raw water. These variables necessitate a systematic, data-driven approach to performance evaluation and process optimization.

Currently, numerous studies are being conducted on chlorine dioxide-based oxidation processes used in water purification. Approaches for evaluating and controlling the formation of disinfection by-products (DBP) are being proposed, while kinetic and mechanistic data on the reactivity of ClO_2 toward micropollutants are also under active discussion. ClO_2 reacts selectively with electron-rich moieties (such as anilines, phenols, olefins, and amines) and removes certain inorganic ions and microorganisms with high efficiency. Nevertheless, the formation of chlorite and chlorate during the oxidation process remains a critical issue in ClO_2-based treatment.

Mathematical modeling offers a powerful tool for analyzing the dynamic behavior of water treatment systems. By integrating real-time monitoring data into predictive models, researchers and practitioners can gain deeper insights into the efficiency, stability, and potential risks associated with water purification processes. Such analyses enable the identification of critical control points, the simulation of various operational scenarios, and the support of decision-making aimed at reducing environmental impact and improving public health outcomes [3-6].

This study presents a mathematical analysis of a chlorine dioxide water purification system based on monitoring data collected from a Dniprovska municipal water treatment station in Kyiv, Ukraine. The primary objectives of the research are: 1) to evaluate the impact of key parameters on the effectiveness and stability of the system; and 2) to assess the ecological and sustainability implications of optimizing chlorine dioxide usage. By addressing these goals, the study aims to contribute to the broader discourse on sustainable water management and support Ukraine's progress toward achieving key targets of the United Nations Sustainable Development Goals (SDG), including SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and SDG 12 (Responsible Consumption and Production).

Through the application of quantitative analysis and systems thinking, this research underscores the ecological significance of enhancing disinfection practices in municipal water treatment and highlights the role of scientific modeling in the transition toward more sustainable and resilient urban infrastructure.

According to the Target Program "Drinking Water of Kyiv for 2011-2020", approved by Resolution No. 220/5032 of the Kyiv City Council dated November 4, 2010, a comprehensive reconstruction of the Dnipro Water Treatment Plant was carried out. The designed treatment technology involves two stages of chlorine dioxide application: primary treatment (pre-oxidation) – prior to supplying water to the treatment facilities, and secondary treatment (post-disinfection) – chlorine dioxide disinfection of drinking water after rapid filtration. Additionally, ferrous chloride

($FeCl_2$) is applied to remove chlorites and residual chlorine dioxide concentrations. For chlorine dioxide production, hydrochloric acid and sodium chlorite are used as raw materials.

The primary treatment (pre-oxidation) is performed at the first lift pumping station, before water enters the treatment facilities. Chlorine dioxide is dosed into the water in quantities sufficient to oxidize organic and inorganic contaminants. To achieve this, a residual chlorine dioxide concentration of 0.2-0.4 mg/dm^3 must be maintained at the inlet of the mixing chambers.

After a certain contact time (20-30 minutes), during which oxidation of contaminants occurs and chlorites are formed, the water enters the mixing units. Prior to mixing, ferrous chloride ($FeCl_2$) is dosed to remove chlorites and any remaining chlorine dioxide. The $FeCl_2$ dosing unit in the mixing block consists of four injection points. Chlorine dioxide and residual chlorite concentrations are measured upstream of the mixers, and redox potential is monitored downstream. The dosing of $FeCl_2$ is automatically regulated to achieve near-zero concentrations of residual chlorine dioxide and chlorites. Compliance with these parameters is ensured through specialized instrumentation.

The secondary chlorine dioxide treatment (post-disinfection stage) is conducted after rapid filtration. This stage is intended to ensure microbiological safety and maintain a residual chlorine dioxide concentration of at least 0.1 mg/dm^3 in the drinking water as it enters the distribution network. To this end, the filter block is equipped with four dosing points for chlorine dioxide. The dosing of the disinfectant solution is also based on real-time data obtained from dedicated measurement devices.

Preliminary studies indicate a "dose-time" dependency in the use of chlorine dioxide in the Dnipro treatment process. The lowest doses are applied during the winter, while the highest are used in summer, late spring, and early autumn. Despite this seasonal variability, the residual chlorine dioxide concentration in disinfected drinking water after the clean water reservoir (CWR) consistently meets regulatory standards – no less than 0.1 mg/ dm^3 for ClO_2 and below 0.2 mg/ dm^3 for chlorites (with a current standard of 0.2 mg/ dm^3). However, during unfavorable seasonal periods, it is important to adopt a higher chlorite threshold (up to the WHO-recommended level of 0.7 mg/ dm^3) to enhance the barrier function of the treatment facilities and improve disinfection reliability. Currently, the Ministry of Health of Ukraine is considering updating the outdated Soviet-era chlorite standard of 0.2 mg/ dm^3 to 0.7 mg/ dm^3, in line with WHO recommendations and European Union practices. This transitional adjustment is allowed in Ukraine under Order No. 683 of the Ministry of Health of Ukraine, dated April 22, 2022.

Monthly data on a selected set of water quality parameters (color, pH, permanganate oxidizability, total organic carbon (TOC), phytoplankton, chlorine dioxide, chlorites), measured over a two-year period at control points of the water treatment process, are presented in Fig. 1.

The presented study was conducted within the framework of the research projects "Technological principles of minimizing the content of chlorites in drinking water after disinfection with chlorine dioxide" (State Registration Number: 0125U001784) and "Computer simulation and optimization of sustainable water management technological networks" (State Registration Number: 0124U002127).

The concentrations of chlorine dioxide and chlorites obtained at the treatment process control points by means of chromatographic and complementary analytical techniques correspond well to the water quality parameter data.

Boxplot diagrams (Figure 2, a-g) enabled a visual comparison of temporal changes in relative concentration values, assessment of the mean (central tendency), the range (variability) of the studied relative water quality characteristics, and the identification of outliers (abnormally high or low values) in the dataset. Anomalous values (outliers in the time series) of relative concentrations for phytoplankton and ClO_2 residual concentration are indicated with asterisks in Figures 2a and 2b, respectively. These anomalous values remain within the normative range. Figure 2h presents a typical interval distribution diagram of the treated water parameters using total organic carbon (TOC) as an example.

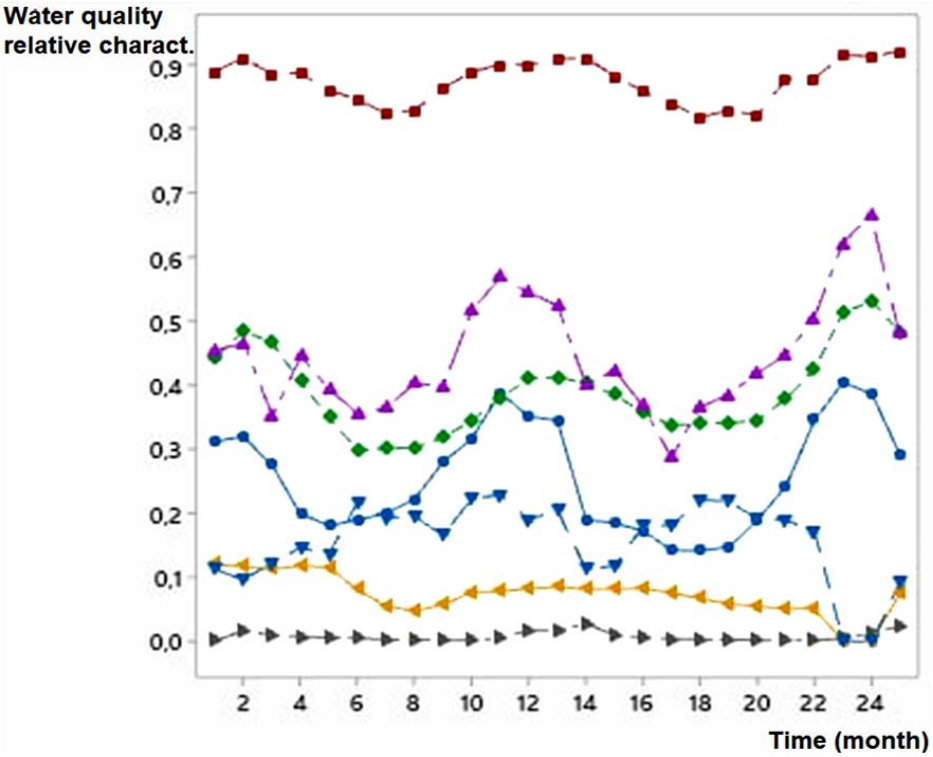


Figure 1. *Change in relative water quality characteristics over time by month:*
– color, – pH; permanganate oxidizability; – monomer total organic carbon (TOC);
– phytoplankton; – chlorine dioxide (residual); – chlorites (residual)

Monitoring of the selected set of water quality parameters over a two-year period revealed the expected average values and ranges for each of the investigated indicators. As shown in the diagrams, the drinking water complied with regulatory standards even under conditions of anomalous contamination of river water, which confirms both the effectiveness of the implemented technological solutions and the operational efficiency of the adopted treatment scheme.

Based on the mathematical analysis of the obtained results, a preliminary conclusion can be drawn that the adopted technological solutions and the operation of the implemented treatment network are effective in ensuring the epidemiological safety and chemical harmlessness of drinking water treated with chlorine dioxide. Moreover, it aligns with the principles of sustainable development, particularly in enhancing the resilience of water infrastructure and advancing progress toward the United Nations Sustainable Development Goals, including clean water and sanitation (SDG 6) and sustainable cities and communities (SDG 11).

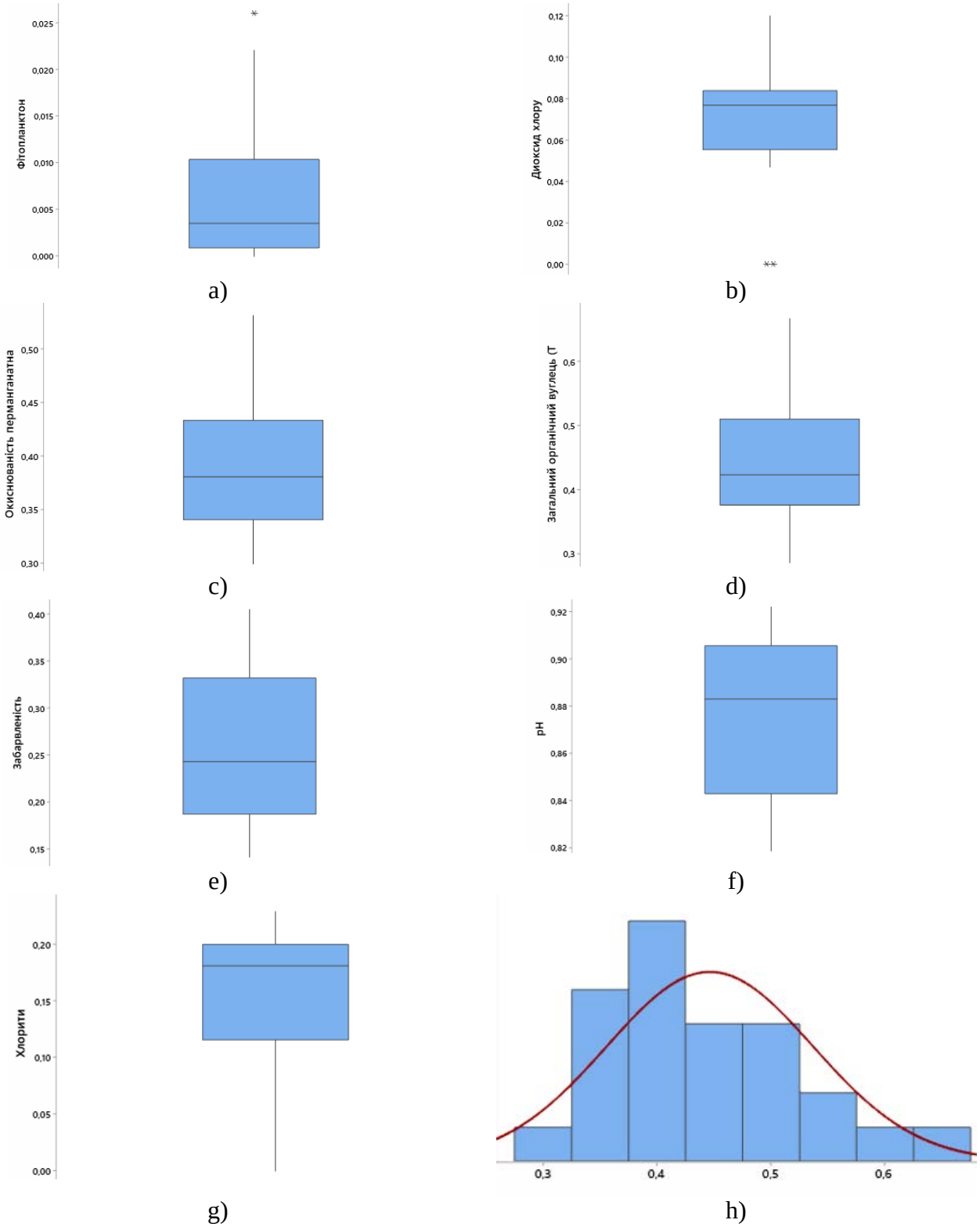


Fig. 2. *Statistical analysis of the relative parameters of the purified water quality: a) – g) – boxplot diagrams of the range of water quality characteristics (phytoplankton, residual chlorine dioxide, permanganate oxidizability, total organic carbon, color, pH, residual chlorites respectively); g) histogram of the distribution by "Total organic carbon"*

The presented study was conducted within the framework of the research projects "Technological principles of minimizing the content of chlorites in drinking water after disinfection with chlorine dioxide" (State Registration Number: 0125U001784) and "Computer simulation and optimization of sustainable water management technological networks" (State Registration Number: 0124U002127).

References

1. Schmidt, W. Using chlorine dioxide for drinking water disinfection by the application of the chlorine/chlorite process. *Acta hydrochimica et hydrobiologica* **2004**, *32*. 48-60. DOI: https://doi.org/10.1002/aheh.200200515
2. Mokiienko, A. *Dioksyd khloru* [Chlorine dioxide]. Vol. 1. Monohraph. **2025**. 611 p. URL: https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd_hloru_T.1.pdf (in Ukrainian).
3. Richardson, S. D.; et al. Identification of new drinking water disinfection by-products from ozone, chlorine dioxide, chloramine, and chlorine. *Water, Air, and Soil Pollution* 2000, 123. 95-102. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1005265509813
4. Korn, C.; Andrews, R. C.; Escobar, M. D. Development of chlorine dioxide-related by-product models for drinking water treatment. *Water Research* 2002, *36(1)*. 330–342. DOI: 10.1016/s0043-1354(01)00194-4
5. Sorlini, S.; et. al. Influence of drinking water treatments on chlorine dioxide consumption and chlorite/chlorate formation. *Water Research* 2014, 54. 44–52. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.038
6. Mohammadpour, A.; et al. Trihalomethanes in chlorinated drinking water: Seasonal variations and health risk assessment in southern Iran. *Groundwater for Sustainable Development* **2024**, *27*. 101342. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101342

МОНІТОРИНГ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЧИСЛОВИХ РЯДІВ ЯКОСТІ ВОДИ, ЗНЕЗАРАЖЕНОЇ ДІОКСИДОМ ХЛОРУ

Олександр БОНДАРЧУК
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6816-0532

Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2963-4026

Лариса СПАСЬОНОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7562-7241

Андрій МОКІЄНКО
Національний університет «Острозька академія»
Вул. Семінарська, 2, м. Острог, 35800, Україна
https://orcid.org/0000-0002-4491-001X

Роман БОХЕНЕК
Ряшівська політехніка імені Ігнатія Лукасевича
al. Powstańców Warszawy 12, m. Rzeszów, 35-959, Польща
https://orcid.org/0000-0003-3909-8394

Анотація: В умовах військового часу та періоду поствоєнного відновлення стале керування міськими водни ми ресурсами набуває великого значення у контексті глобальних екологічних викликів і вимог громадського здоров'я. З комплексом своїх характеристик діоксид хлору посідає ключове місце серед доступних нині методів дезінфекції води внаслідок його високої ефективності у боротьбі з мікроорганізмами та меншого потенціалу утворення небезпечних побічних продуктів дезінфекції. При цьому, для забезпечення ефективності, надійності, та безпечності систем знезараження води важливо доцільно керуватися системним науковим підходом до проєктування, оцінювання та прогнозування продуктивності таких систем в умовах змінного зовнішнього середовища.

Представлене дослідження мало на меті математичний аналіз систем очищення води на основі діоксиду хлору з використанням даних моніторингу Дніпровської водоочисної станції в м. Києві. Інтеграція математичного моделювання з моніторингом якості води в реальному часі пропонує надійний підхід до оптимізації робочих параметрів, виявлення аномалій і підвищення загальної ефективності очищення.

Моніторинг за обраним набором параметрів якості води протягом дворічного періоду виявив очікувані середні значення та діапазони для кожного з досліджуваних показників. Як показав аналіз, навіть за умов аномального забруднення річкової води питна вода відповідала нормативним нормам, що підтверджує як ефективність впроваджених технологічних рішень, так і ефективність роботи прийнятої схеми очищення.

На підставі математичного аналізу отриманих результатів зроблено висновок про ефективність прийнятих технологічних рішень та роботи впровадженої технології очищення води щодо забезпечення епідеміологічної безпеки питної води, обробленої діоксидом хлору.

Ключові слова: очищення природних вод, водоочисні споруди, знезараження, діоксид хлору, моніторинг, статистичний аналіз, цілі сталого розвитку.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331224

MODERNIZATION OF GROUNDWATER MONITORING SYSTEM IN THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE: CHALLENGES AND IMPLEMENTATION OF INTERNATIONAL STANDARDS

Dmitri BUGAI, Dmytro HRYHORENKO
[1]*Institute of Geological Science of the Ukrainian National Academy of Sciences*
55B Olesya Honchara Street, Kyiv, 01054, Ukraine
e-mail: dmitri.bugay@gmail.com

Abstract

The Chornobyl Exclusion Zone remains one of the most radioactively contaminated territories in the world, and the state of its water resources continues to play an important role in long-term radiological impacts on downstream populations in the Pripyat – Dnieper basin. Radiation monitoring of surface and groundwater in the ChEZ is a key tool for assessing radionuclide migration, predicting environmental risks, and supporting decision-making in post-accident management. However, the current monitoring infrastructure was largely established in the early 1990-ies and no longer meets modern scientific, technical, or regulatory demands. This work explores current challenges and opportunities in enhancing the monitoring system for water resources in the Chornobyl Exclusion Zone. Particular attention is paid to the overall need for harmonization with international standards including modernization of the monitoring network, optimization of monitoring program, integration of modern sensor technologies, and introduction of the efficient data management and analysis tools.

Key words: *Chornobyl Exclusion Zone, groundwater monitoring, radioactive contamination, hydrogeological modeling, international standards, environmental safety.*

The Chornobyl Exclusion Zone (ChEZ) encompasses a complex system of radiation-hazardous objects and contaminated environments, resulting from the 1986 nuclear accident at Unit 4 of the Chornobyl Nuclear Power Plant (ChNPP). These include the "Shelter" object (the original "Sarcophagus"), highly contaminated by radioactive fallout terrestrial areas, legacy radioactive waste disposal sites (e.g., the Red Forest), and multiple water bodies containing radionuclide-contanated sediments (e.g., the former ChNPP cooling pond). In addition, the 10-km zone surrounding the ChNPP hosts numerous facilities associated with radioactive waste and spent nuclear fuel (SNF) management, including "Pidlisny", " 3-rd Stage of ChNPP", "Buryakivka" disposal sites, and the "Vector" industrial complex, which includes newly commissioned and planned near-surface waste storage and disposal infrastructure. Many of these facilities, along with the legacy contamination of soils and sediments, constitute actual or potential sources of radionuclide leaching to the hydrogeological system of the ChEZ. Monitoring and understanding the behavior of radionuclides in groundwater is therefore a critical component of radiation safety and long-term environmental management of the area.

The current groundwater monitoring network in the ChEZ [1,2], largely established in the early 1990s, is outdated in both design and functionality. Most wells were constructed using technologies no longer considered adequate by modern hydrogeological standards. A significant number of wells are equipped with long (up to 12 m) screens, producing depth-integrated samples that limit vertical resolution and complicate hydrostratigraphic interpretation. Corroding steel casings introduce geochemical artifacts and may impact the accuracy of measured radionuclide activity concentrations due to redox changes or sorption. The spatial distribution of wells is uneven. While some key infrastructure facilities are surrounded by relatively dense monitoring networks, large intermediate areas lack any observation points, hindering regional assessments of groundwater flow and contaminant transport pathways.

Field sampling remains largely manual and labor-intensive, employing basic tools such as water level popper gauges and bailers. These practices are prone to human error and inconsistent sampling conditions. Moreover, the temporal frequency of sampling is poorly aligned with the time dynamics of critical hydrogeological and radiological parameters.

Another limitation is the restricted range of measured parameters. Monitoring program still focuses almost exclusively on radionuclide activity concentrations, while neglecting essential geochemical indicators such as pH, Eh, major ions, and dissolved organic carbon. Without these data, reliable modeling of radionuclide speciation and mobility remains impossible.

Recent changes in the hydrological landscape of the ChEZ have further complicated the monitoring task. The 2014 drainage of the ChNPP cooling pond led to a dramatic drop in local groundwater levels, desaturating parts of the aquifer and altering flow patterns. This was compounded by the establishment of the Chornobyl Radioecological Biosphere Reserve in 2016, which reclassified much of the Exclusion Zone while preserving a core industrial area around the plant.

Moreover, the 2022 Russian invasion of Ukraine resulted in the temporary occupation of the ChEZ, during which time laboratories and monitoring equipment were looted or destroyed. Restricted access to key areas and a shortage of qualified personnel have only intensified the already critical need for modernization of the monitoring system.

Leading international organizations such as the International Atomic Energy Agency (IAEA), the International Organization for Standardization (ISO), and the American Society for Testing and Materials (ASTM) have developed detailed guidelines and protocols for the design and operation of groundwater monitoring systems. These standards ensure the quality, reproducibility, and comparability of monitoring data and facilitate international collaboration and knowledge exchange. For example, the IAEA's safety guides and technical reports — such as SSG-31 and SRS-35 on monitoring for radioactive waste disposal facilities, TRS-391 and TRS-424 which outline methodologies for site characterization and the design of long-term monitoring systems [3–7].

Similarly, the ISO 5667 series provides detailed procedural guidance for sampling design, field methods, sample handling, and quality assurance in water monitoring, including recent revisions that reflect advances in sensor technology and environmental data management (e.g., ISO 5667-1:2023, ISO 5667-3:2024). These standards help ensure data reliability and long-term comparability, especially important in long-duration environmental monitoring campaigns such as those required in the ChEZ [8–11].

In parallel, ASTM standards offer a technical foundation for the design, construction, and operation of groundwater monitoring wells. Documents such as ASTM D5092/D5092M-16 (2024 revision) address proper well installation methods, while ASTM D4448-01 and ASTM D6089-19 detail procedures for groundwater sampling, sample documentation, and analytical QA/QC protocols [12-14]. The implementation of such internationally validated methods is essential for ensuring that the

monitoring system in the ChEZ can serve not only domestic regulatory needs but also align with transboundary water management standards and international environmental safety obligations.

These internationally recognized frameworks—formulated by IAEA, ISO, and ASTM—provide the scientific and regulatory basis for the modernization of environmental monitoring systems at nuclear legacy sites. Their adoption is essential for enhancing the reliability, comparability, and transparency of data, particularly in transboundary contexts. Building on this foundation, the current EU-funded project (INSC/2023/442-544) aims to implement these best practices in the specific context of the Chornobyl Exclusion Zone. By adapting international methodologies to site-specific hydrogeological and institutional conditions, the project seeks to develop a technically sound and future-proof groundwater monitoring system. This modernization effort is not limited to hardware and instrumentation—it encompasses a full-spectrum redesign of monitoring strategies, sampling protocols, data integration, and institutional coordination mechanisms.

One of the core elements of this effort is the design and installation of a new generation of monitoring wells. These wells will use chemically inert and corrosion-resistant materials, such as polyvinyl chloride (PVC) or high-density polyethylene (HDPE), to preserve the integrity of hydrochemical measurements. The screen intervals will be reduced and precisely positioned within the aquifer to enable discrete-depth sampling, thereby improving the vertical resolution of contamination data. Each well will incorporate bentonite seals to prevent vertical flow along the borehole annulus, minimizing cross-contamination between hydrostratigraphic layers.

In parallel, the spatial footprint of the monitoring network is being reassessed and expanded. Current configurations leave critical areas—especially those between major waste management sites like the Vector complex and the ChNPP industrial area—either sparsely monitored or entirely unobserved. New monitoring points will be strategically located to fill these spatial gaps and provide better coverage of suspected radionuclide migration pathways and downgradient discharge zones, including those adjacent to surface water bodies.

To improve the temporal resolution and reduce dependence on manual sampling, the project also envisions a broad deployment of automated sensors, such as TD-Diver-type water level and temperature loggers. These devices will provide high-frequency, autonomous measurements that capture seasonal and event-based hydrodynamic fluctuations. Where warranted by risk or site sensitivity, some locations may be equipped with telemetry-enabled sensors capable of real-time data transmission to central servers.

Equally important is the integration of standardized and scientifically robust groundwater sampling protocols. These include preliminary well purging to remove stagnant water, in-line filtration through 0.45 μm membranes, immediate stabilization of samples to preserve redox and chemical conditions, and on-site measurements of key geochemical parameters such as pH, redox potential (Eh), electrical conductivity, and dissolved oxygen. These additions are vital for understanding the geochemical controls on radionuclide mobility, including sorption/desorption dynamics and colloid-facilitated transport.

The data collected from the modernized system will be synthesized and interpreted through the development of a regional groundwater flow and radionuclide transport model based on the MODFLOW FLEX 10 numerical framework. This model, incorporating both unconfined Quaternary and confined Eocene aquifers, will be calibrated against recent monitoring data and used to simulate contaminant migration patterns under current and future hydrogeological scenarios. It will also serve as a decision-support tool for optimizing the placement of additional wells and assessing long-term safety and exposure risks.

To ensure data usability and regulatory compliance, a unified, SQL-based monitoring database will be established, complemented by a geographic information system (GIS) interface. This digital platform

will enable spatial visualization of groundwater quality, facilitate trend analysis using statistical methods, and streamline reporting to Ukrainian authorities and international partners. The system will be designed to accommodate both manually collected and automatically transmitted data, with provisions for metadata handling, quality control, and secure access.

Institutional coordination is also a central component of the modernization initiative. The project fosters the harmonization of sampling schedules, analyte lists, and laboratory methodologies across the major actors in the zone—namely, SSE "Ecocenter", SSE "Chornobyl NPP", and SSE "CERWM". Provisions are made for inter-laboratory comparison exercises to validate radionuclide measurements, as well as for shared protocols on data formatting and exchange.

Finally, the upgraded groundwater monitoring system is being designed to align with broader national and European radiation monitoring infrastructures. This includes compatibility with Ukraine's Integrated Automated Radiation Monitoring System (IARMS), as well as data export capabilities to EU-level repositories such as the European Groundwater Monitoring (EUGM) platform and the EcoZagroza environmental hazard information system. Such integration not only enhances transparency and interoperability but also positions Ukraine to meet its international environmental monitoring obligations in the context of post-accident legacy site management.

Groundwater monitoring in the Chornobyl Exclusion Zone stands at the intersection of environmental science, nuclear safety, and geopolitical instability. The challenges posed by outdated infrastructure, evolving hydrological conditions, and institutional fragmentation demand a modernized, coordinated, and science-driven monitoring approach. By adopting state-of-the-art field methods, analytical protocols, and modeling tools, the ChEZ can serve as a global reference case for long-term environmental management of nuclear legacy sites.

References

1. Bondarkov M., Oskolkov B., Gashchak S., Kireev S., Maksimenko A., Proskura N., Jannik G., Farfán E. (2011). Environmental radiation monitoring in the Chernobyl Exclusion Zone-history and results 25 years after. Health physics. 101 (4), 442-485. https://doi.org/10.1097/HP.0b013e318229df28.

2. Dzhepo, S. P., Skal'skij, A. S., & Bugaj, D. A. (1996). Problems of ground-water monitoring in the Chernobyl NPP exclusion zone. Geologyichnij zhurnal, no.1-2, p. 107–112 (in Russian)

3. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA Safety Standards Series No. SSG-31. Vienna: IAEA.

4. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2004). Surveillance and Monitoring of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA Safety Reports Series No. SRS-35. Vienna: IAEA.

5. International Atomic Energy Agency (IAEA). (1999). Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste. IAEA Technical Reports Series No. TRS-391. Vienna: IAEA.

6. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2012). Monitoring for Compliance with Remediation Criteria for Sites. IAEA Safety Reports Series No. SRS-72. Vienna: IAEA.

7. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2004). Remediation of Sites with Dispersed Radioactive Contamination. IAEA Technical Reports Series No. TRS-424. Vienna: IAEA.

8. International Organization for Standardization (ISO). (2023). Water quality – Sampling – Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques. ISO 5667-1:2023. Geneva: ISO.

9. International Organization for Standardization (ISO). (2009). Water quality – Sampling – Part 11: Guidance on sampling of groundwaters. ISO 5667-11:2009. Geneva: ISO.

10. International Organization for Standardization (ISO). (2024). Water quality – Sampling – Part 3: Preservation and handling of water samples. ISO 5667-3:2024. Geneva: ISO.

11. International Organization for Standardization (ISO). (2014). Water quality – Sampling – Part 14: Guidance on quality assurance and quality control of environmental water sampling and handling. ISO 5667-14:2014. Geneva: ISO.

12. ASTM International. (2019). Standard Guide for Sampling Ground-Water Monitoring Wells. ASTM D4448-01 (2019). West Conshohocken, PA: ASTM International.

13. ASTM International. (2019). Standard Guide for Documenting a Groundwater Sampling Event. ASTM D6089-19. West Conshohocken, PA: ASTM International.

14. ASTM International. (2024). Standard Practice for Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells. ASTM D5092/D5092M-16 (2024). West Conshohocken, PA: ASTM International.

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МОНИТОРИНГУ ПІДЗЕМНИХ ВОД У ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС: ВИКЛИКИ ТА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ

Дмитро БУГАЙ
Інститут Геологічних Наук Національної Академії Наук України
вулиця Олеся Гончара, 55Б, Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0002-2404-5639

Дмитро ГРИГОРЕНКО
Інститут Геологічних Наук Національної Академії Наук України
вулиця Олеся Гончара, 55Б, Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0009-0004-3312-3178

Анотація

Зона відчуження Чорнобильської АЕС залишається однією з найбільш радіаційно забруднених територій у світі, а стан її водних ресурсів і надалі відіграє важливу роль у формуванні довготривалих радіаційних наслідків для населення, що проживає нижче за течією у басейні Прип'яті – Дніпра. Радіаційний моніторинг поверхневих і підземних вод у зоні відчуження є ключовим інструментом для оцінки міграції радіонуклідів, прогнозування екологічних ризиків та підтримки прийняття рішень у післяаварійному управлінні. Водночас наявна інфраструктура моніторингу була здебільшого створена на початку 1990-х років і більше не відповідає сучасним науковим, технічним та нормативним вимогам. У даній роботі розглядаються актуальні виклики та можливості для вдосконалення системи моніторингу водних ресурсів у зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Особливу увагу приділено необхідності гармонізації з міжнародними стандартами, включаючи модернізацію моніторингової мережі, оптимізацію моніторингових програм, інтеграцію сучасних сенсорних технологій та впровадження ефективних інструментів управління та аналізу даних.

Ключові слова: зона відчуження Чорнобильської АЕС, моніторинг підземних вод, радіоактивне забруднення, гідрогеологічне моделювання, міжнародні стандарти, екологічна безпека.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331065

STUDY OF SOIL MICROBIOTA RESPONSE TO OIL POLLUTION

Valeriia VEMBER[1], Olena LAVRYNENKO[2], Mykhailo BONDARENKO[1]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
[2]*I. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine*
3, Omeliana Pritsaka St., 03142, Kyiv, Ukraine
e-mail: vvember@gmail.com

Abstract

Oil and petroleum products are one of the most dangerous types of pollution, which can manifest itself at all stages of technogenesis. Understanding the changes that occur in the soil when various amounts of oil enter it, and the reactions of living organisms to pollution, make it possible to correctly determine the state of the soil ecosystem and select effective remedial measures in specific conditions of oil contamination of the soil. Therefore, the aim of this work was to study the reaction of different parts of the soil microbiota to oil pollution.

To determine the response of soil microorganisms to oil pollution, we studied the dynamics of the number of the main physiological groups of bacteria and microscopic fungi in soils with a certain oil content. The following oil concentrations were used in this study: 1, 5, 10, 50, 100, 200, 300, 500 cm³/kg.

A study of the dynamics of microflora in oil-contaminated soils showed a significant linear increase in the number of microorganisms of various ecological and physiological groups in the concentration range of 10÷100 cm^3/kg. It has been shown that the basis of the microcenosis of the studied soil at high oil concentrations is spore-forming and hydrocarbon-oxidizing bacteria.

Unlike to bacteria, microscopic fungi showed a sharp decrease in the number of colony-forming units (CFU) at oil concentrations in the soil at a level of 10-100 cm^3/kg. However, in the range of high oil concentrations, their number remained at an almost constant level and at an oil level of 500 cm^3/kg was almost twice as high as the number of bacteria.

Keywords: *oil, pollution, soil, microbiota, toxicity, standardization.*

Introduction

In today's world, environmental pollution from technogenic waste is intensifying. One of the most serious ecological threats is the contamination of water bodies and soils by oil and petroleum products [1-4]. Oil pollutants are resistant to degradation due to their complex structure and high stability under environmental conditions (temperature, solar radiation, humidity, etc.). Among terrestrial ecosystem components, soils are the first to suffer from oil contamination. Due to the soil's high adsorption capacity, oil can persist for long periods, causing the loss of soil value and spreading pollutants into the air, water, and food chains [1].

Regulation and Assessment of Soil Contaminated by Petroleum Products

Effective environmental protection requires accurate information about the state of contaminated soils. Pollution levels exceeding the soil's self-purification potential are considered dangerous. Therefore, defining acceptable or safe levels of oil contamination is essential. However, there are no universally accepted standards. In Europe, a threshold of 1–3 g/kg is considered safe, and 20 g/kg marks serious ecological damage. In Ukraine, there is only a tentative permissible concentration (TPC) of 0.2 g/kg. Another regulatory document defines TPC as 4 g/kg, commonly used for oil contamination assessments.

Changes in Soil Properties Due to Oil Polution

Oil-contaminated sites develop a specific microclimate due to altered substrate composition, disrupted water and temperature regimes, and characteristic odor. Color changes (dark hues) enhance solar absorption and overheating [5-7]. If the pollutant includes salts, salinization also occurs (Fig. 1).

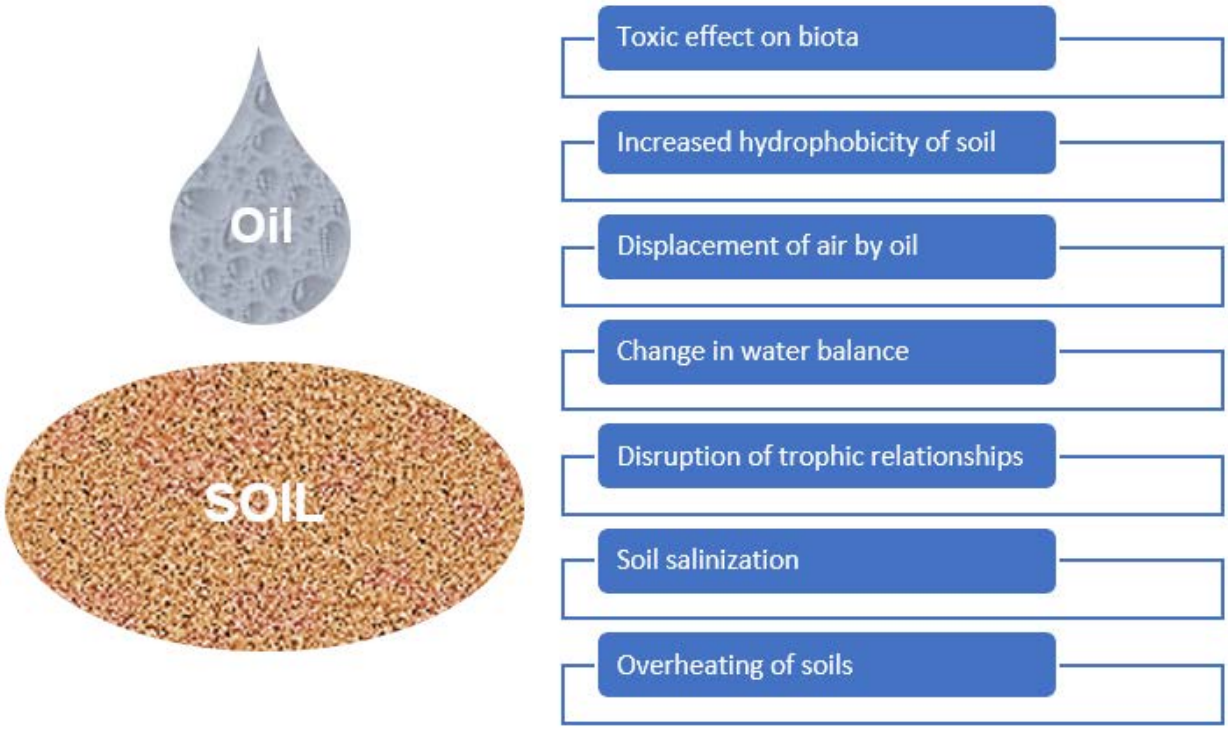


Fig. 1. *Effects of petroleum product contamination on soils*

Impact of Oil on Living Organisms

Soil biological properties drastically change upon oil contamination, particularly with decreased enzyme activity. Enzyme sensitivity to oil follows this order: dehydrogenase > catalase > urease > invertase [3].

Hydrocarbons alter soil physicochemical properties, reduce nutrient availability, and exert direct toxicity, particularly from volatile aromatics (benzene, toluene, xylene), naphthalene, and other water-soluble compounds [8]. Oil affects soil microorganisms differently—some are suppressed, others stimulated—depending on contaminant concentration and composition.

Actinomycetes, nitrifiers, and cellulolytic microbes are highly sensitive, while hydrocarbon-oxidizing bacteria and micromycetes thrive, using hydrocarbons as nutrients. Phytopathogenic and allergenic fungi can increase in number [9-10].

Soil algae respond similarly: low oil concentrations (0.01%) stimulate green algae growth (Chlorella homosphaera, Chlorella vulgaris), while higher concentrations (0.3%) reduce it. Cyanobacteria are most resilient and may utilize oil hydrocarbons [3].

Understanding these changes helps assess soil ecosystem health and determine effective remediation strategies.

Research Objective

To investigate the response of various components of soil microbiota to oil contamination.

Materials and Methods

Typical clay loam chernozem was used, sampled from a depth of 5–20 cm. Air-dried soil was sieved (1 mm mesh), moistened to 60 % field capacity, and mixed with crude oil from the Dnipro-Donetsk region (sulfur content: 0.2 %; density: 0.85 g/cm³).

Oil concentrations used: 1, 5, 10, 50, 100, 200, 300, 500 cm³/kg. Microbial groups studied: saprophytic bacteria (meat-peptone agar), spore-forming bacteria (Gromyko medium), hydrocarbon-oxidizing bacteria (Tauson's mineral medium with oil), and micromycetes (starch-ammonia agar, pH 6.5–7.8).

Results and Discussion

Impact on Saprophytic Microflora

A linear increase in saprophyte numbers was observed at 10–100 cm³/kg, followed by a sharp decline at higher concentrations (Fig. 2). At 500 cm³/kg, microbial activity was nearly suppressed.

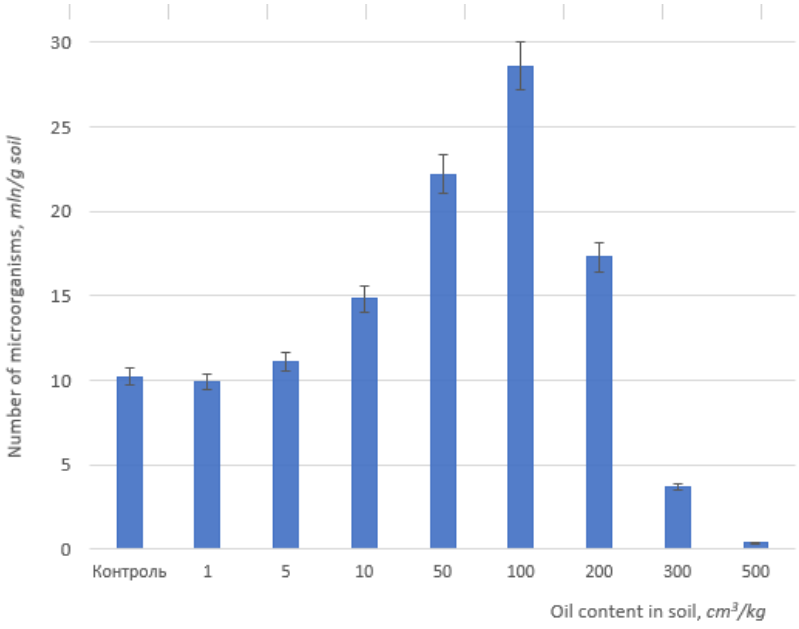


Fig. 2. *Impact of oil pollution on saprophytic microflora*

Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria (HOB)

When soil is contaminated with oil, the ecological group of hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOBs) is of particular importance, as they are able to use oil and petroleum products as the sole source of carbon and energy. Hydrocarbon-oxidizing microorganisms are part of the heterotrophic community and are present in both oil-polluted and unpolluted ecosystems. They differ from other microorganisms in the presence of a complex of enzymes that oxidize hydrocarbons and the ability to absorb hydrophobic substrates. Soil contamination with oil and petroleum products introduces an additional source of carbon into the ecosystem, which stimulates the development of this group of bacteria (Fig. 3). A decrease in the number of microorganisms of this physiological group was observed only at the highest of the studied concentrations.

Spore-Forming Bacteria

As for spore-forming bacteria, they demonstrated high resistance to oil contamination of soils, which is facilitated by the high resistance of spores to many adverse environmental factors (Fig. 4). The concentration range from 10 to 100 cm^3/kg is noteworthy, at which the number of bacteria of this group reaches a maximum and almost does not change. The number of spore-forming bacteria is slightly lower at an oil concentration of 200 cm^3/kg. At a concentration of 500 cm^3/kg, the number of representatives of spore-forming bacteria is almost equal to the number of saprotrophic bacteria at a given concentration, which indicates that the basis of the microcenosis of the studied soil at high oil concentrations is spore-forming bacteria.

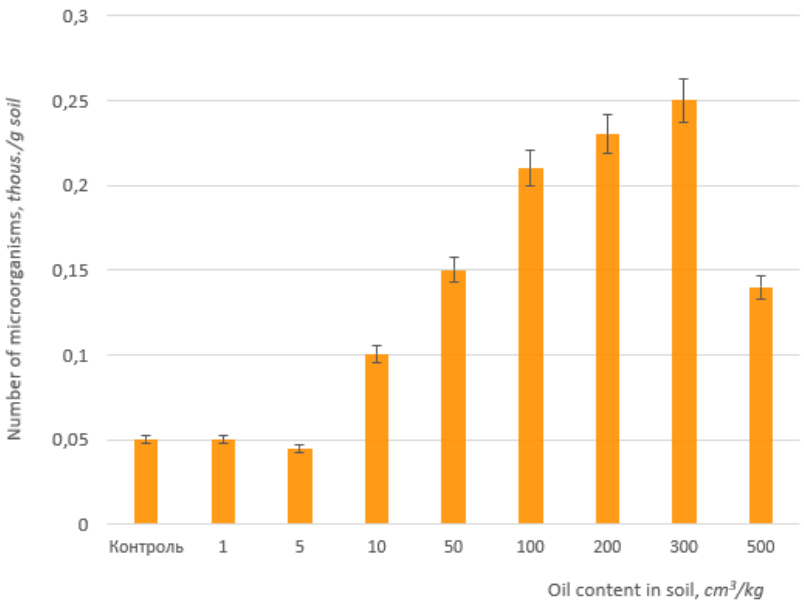


Fig. 3. *Impact of oil pollution on hydrocarbon-oxidizing bacteria*

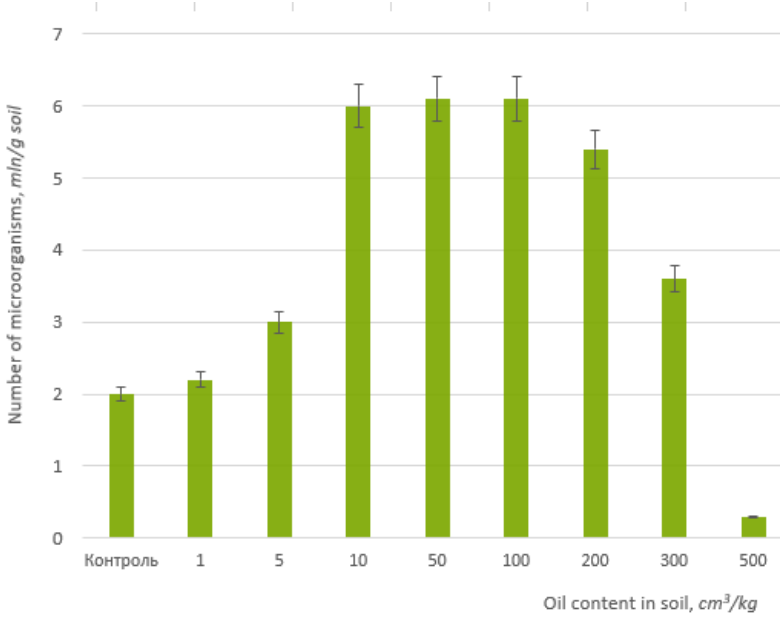


Fig. 4. *Impact of oil pollution on spore-forming bacteria*

Micromycetes

Unlike bacteria, which at an oil concentration in the soil at a level of 10-100 cm^3/kg showed an increase in the number of all physiological groups compared to the control, microscopic fungi demonstrated a sharp decrease in the number of colony-forming units (CFU) in this concentration range (Fig. 5). The obtained result somewhat contradicts the established idea of high resistance of microscopic fungi to contamination by oil products. However, in the range of high oil concentrations, their number remained at an almost constant level and at an oil load of 500 cm^3/kg was almost twice as high as the number of bacteria.

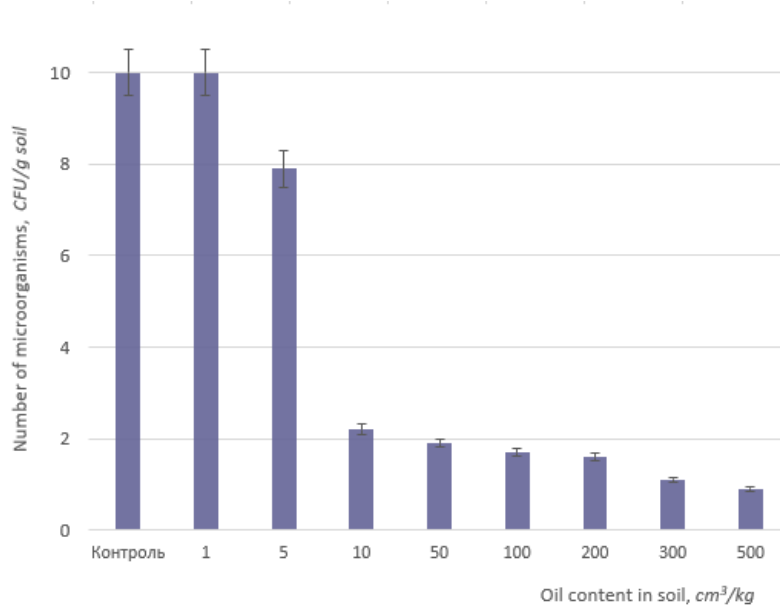


Fig. 5. *Impact of oil pollution on micromycetes*

Conclusions

The oil industry, playing an important role in the global economy, is one of the most intensive sources of environmental pollution. The production, transportation, storage and sale of oil and petroleum products significantly affect the state of the environment, leading to profound changes in all its components. In general, in oil-contaminated soils, there is a violation of the ecological balance in the soil system; a change in the morphological, physical, physicochemical and chemical characteristics of soil horizons and the structure of the soil profile; a violation of the natural ratio between individual groups and fractions of soil organic matter; penetration of oil and oil products into groundwater; reduction in soil fertility and the emergence of toxicologically dangerous situations. The absence of established MPC standards for most petroleum products makes it impossible to take into account the environmental hazard of the combined action of hydrocarbons. An integrated environmental assessment, which links the level of oil contamination of soils with the impact on plant test organisms, provides a quantitative determination of toxicity, pollutant content in the soil and the level of contamination and is the first attempt at a comprehensive assessment of such complex pollution as oil [11-12].

Microorganisms, due to their physiological and genetic characteristics, respond quickly to changes in environmental quality and the effects of stress factors. In this regard, they can be used to assess the degree and nature of environmental pollution. Indicators of biological pollution include microorganisms that secrete hydrolytic enzymes into the environment that can break down organic compounds. Microorganisms are very important for the restoration and purification of our environment. Through destruction, microorganisms are able to degrade and transform a huge number of synthetic and organic compounds and other chemicals that have toxic properties.

References

1. Biletskyi V. S. (2020). Naftoiu y naftoproduktamy zabrudnennia [Pollution by oil and oil products]. Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy: entsyklopediia [elektronna versiia] red.: I. M. Dziuba, A. I. Zhukovskyi, M. H. Zhelezniak ta in., NAN Ukrainy, NTSh. Kyiv: Instytut entsyklopedychnykh doslidzhen NAN Ukrainy, V. 22 (Ukr).

2. Romaniuk, O. I.; Oshchapovskyi, I. V.; Shevchyk, L. Z. (2022). Monitorynh zahazovanosti terytorii m. Boryslava [Monitoring of gas pollution in the territory of Boryslav]. Ekolohichni nauky, 5(44), 36 – 42. doi: 10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44 (Ukr).

3. Shevchyk-Kostiuk, L. Z.; Romaniuk, O. I.; Oshchapovskyi, I. V. (2022). Osoblyvosti zabrudnennia gruntiv naftoiu ta naftoproduktamy: ohliad [Peculiarities of soil pollution by oil and petroleum products: review]. Acta Biologica Ukrainica, (1), 32-40. doi:10.26661/2410-0943-2022-1-04 (Ukr).

4. Shevchyk, L. Z., Romaniuk, O. I. (2016). Vykorystannia oblipykhy krushynovydnoi dlia fitoremediatsii naftozabrudnenykh hruntiv [Using sea buckthorn for phytoremediation of oil-contaminated soils]. Biolohichnyi visnyk MDPU imeni Bohdana Khmelnytskoho, 6 (3), 472–480. doi: 10.15421/2016120 (Ukr).

5. Shevchyk-Kostiuk, L. Z.; Romaniuk, O. I.; Zhak T. V.; Zhak O. V.; Rykmas, Ya.V. (2020). Ekolohichnyi monitorynh gruntovoho pokryvu Boryslavskoho ozokerytovoho rodovyshcha [Ecological monitoring of the soil cover of the Boryslav ozokerite deposit]. Ekolohichni nauky, 1(28), 122-129. doi: 10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.18 (Ukr).

6. Miroshnychenko, M. M. (2005). Stiikist hruntu yak osnova pedoekolohichnoho normuvannia zabrudnennia [Soil stability as the basis for soil-ecological pollution regulation]. Avtoref. dys... d-ra biol. nauk: Kharkiv, Nats. nauk. tsentr „In-t hruntoznavstva ta ahrokhimii im.O.N.Sokolovskoho", 37 s. (Ukr).

7. Babadzhanova, O. F.; Hrynchyshyn, Yu. H.; Sukach, N. M. (2011). Mihratsiia nafty i nafto-produktiv u poverkhnevi shary gruntu pry avariinykh rozlyvakh [Migration of oil and oil products into surface soil layers during accidental spills]. Bezpeka zhyttia i diialnosti liudyny – osvita, nauka, praktyka: zb. nauk. prats Kh mizhnar. nauk.-metod. konf. K.: Natsionalnyi aviatsiinyi universytet, 22-26.

8. Griffin, L. F.; Calder, G. A. (1997). Toxic effect in water-soluble fractions of crude, refined and weathered oils on the growth of a marine bacterium. Appl. Environ. Microbiol., 33(5), 1092-1101. doi: 10.1128/ aem.33.5.1092-1096.1977.

9. Evdokimova, G. A.; Korneykova, M. V.; Lebedeva, E. V. (2013). Complexes of potentially pathogenic microscopic fungi in anthropogenic polluted soils. Environmental science and health. Part A, 48 (7), 746-752. doi: 10.1080/10934529.2013.744615.

10. El-Sheekh, M. M.; El-Naggar, A. H.; Osman, M. E. H.; Haieder, A. (2000). Comparative Studies on the Green Algae Chlorella Homosphaera and Chlorella Vulgaris with Respect to Oil Pollution in the River Nile. Water, Air, & Soil Pollution, 124 (1-2),187-204. doi: 10.1023/A:1005268615405.

11. Romaniuk, O. I.; Shevchyk, L. Z.; Oshchapovskyi, I. V.; Zhak, T. V. (2016). Metodyka ekolo-hichnoho otsiniuvannia naftozabrudnenykh gruntiv [Methodology for ecological assessment of oil-contaminated soils]. Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Biolohiia, ekolohiia, 24(2), 264–269. doi:10.15421/011633.

12. Nosachova, Yu.; Vember, V.; Havrylchenko, B. (2024). Otsinka fitotoksychnoho efektu pry ochyshchenni gruntiv vuhletsevymy sorbentamy [Evaluation of the phytotoxic effect during cleaning of soils with carbon sorbents]. Materialy XXIV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Ekolohiia. Liudyna. Suspilstvo» (5 chervnia 2024 r., m. Kyiv, Ukraina) / Ukladach D. E. Benatov. K.: KPI imeni Ihoria Sikorskoho, 2024: https://ecoconference.kpi.ua/article/view/304029

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ ҐРУНТОВОЇ МІКРОБІОТИ НА НАФТОВЕ ЗАБРУДНЕННЯ

Валерія ВЕМБЕР
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-0790-5350

Олена ЛАВРИНЕНКО
Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
вул. Омеляна Пріцака, 3, 03142, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9256-1221

Михайло БОНДАРЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056, Київ, Україна

Анотація

Нафта та нафтопродукти є одними з найбільш небезпечних видів забруднення, яке може проявлятися на всіх етапах техногенезу. Розуміння змін, які відбуваються з ґрунтом при потраплянні в нього різних кількостей нафти, реакції живих організмів на забруднення дають можливість правильно визначати стан ґрунтової екосистеми та підбирати ефективні ремедіаційні заходи в конкретних умовах нафтового забруднення ґрунту. Тому метою даної роботи стало дослідження реакції різних ланок ґрунтової мікробіоти на нафтове забруднення.

Для визначення реакції ґрунтових мікроорганізмів на нафтове забруднення досліджували динаміку чисельності основних фізіологічних груп бактерій та мікроскопічних грибів у ґрунтах із визначеним вмістом нафти. У даному дослідженні використовували наступні концентрації нафти: 1; 5; 10; 50; 100; 200; 300 та 500 $см^3$/кг.

Дослідження динаміки мікрофлори у забруднених нафтою ґрунтах показало достовірне лінійне зростання чисельності мікроорганізмів різних екологічних та фізіологічних груп у концентраційному діапазоні 10÷100 $см^3$/кг. Подальше підвищення концентрації нафти призводило до зниження чисельності усіх груп бактерій окрім вуглеводнеокиснювальних. Концентрація нафти на рівні 500 $см^3$/кг майже повністю придушувала розвиток ґрунтової мікрофлори. Показано, що основу мікроценозу дослідженого ґрунту при високих концентраціях нафти складають спороутворюючі та вуглеводнеокиснювальні бактерії.

На відміну від бактерій мікроскопічні гриби продемонстрували різке зниження чисельності колонієутворюючих одиниць (КУО) при концентрації нафти у ґрунті на рівні 10÷100 $см^3$/кг. Проте в діапазоні високих концентрацій нафти їхня кількість зберігалася на майже постійному рівні і при нафтовому навантаженні на рівні 500 $см^3$/кг була майже вдвічі вищою за кількість бактерій.

Ключові слова: нафта, забруднення, ґрунти, мікробіота, токсичність, нормування.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329959

REMOVAL OF MAGNESIUM IONS FROM WATER IN DIAPHRAGM ELECTROLYZERS

Bohdan VOSHCHENKO[1], Viacheslav RADOVENCHYK[1], Oleksii TOMIN[2]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
Beresteiskyi Ave, 37, Kyiv, 03056, Ukraine
[2]*Aalto University*
Otakaari 1, 02150 Espoo, Finland
e-mail: pbfpb21@gmail.com

Abstract

This work presents the results of a study on the applicability of electrolysis in two-chamber electrolyzers with a diaphragm for reducing magnesium hardness in aqueous solutions. It was established that conducting electrolysis for 10–60 minutes allows for a reduction in the initial water hardness from 10–30 mg-eq/dm³ to 7 mg-eq/dm³, which meets the current regulatory standards for potable water. The primary factor contributing to hardness reduction is the increase in pH in the cathodic compartment. A slight decrease in hardness was also observed in the anodic compartment, likely due to the diffusion of magnesium ions through the diaphragm into the cathodic chamber. When the electrolyzer is powered by a stabilized DC voltage source, a significant change in current density on the electrodes is observed during electrolysis, caused by the changing conductivity of the solution in the cathodic compartment. Under a constant chemical composition of water, this relationship may be used to monitor the progress of the electrolysis process. The promising results encourage further research in this direction.

Keywords: *electrolysis, water softening, magnesium hardness, magnesium ions (Mg^{2+}), magnesium hydroxide ($Mg(OH)_2$), diaphragm two-chamber electrolyzer, pH, precipitation, filtration, current density.*

The current state of natural water sources continues to deteriorate each year. In addition to anthropogenic pollution, climate change has a significant impact. As a result, the direct use of natural water is steadily decreasing, and most water sources require additional treatment [1]. This is especially true in industrial regions, where natural waters often require preliminary softening — the removal of calcium and magnesium ions.

Traditional softening methods, such as reagent and ion-exchange techniques, require complex equipment, high reagent consumption, and result in the generation of large volumes of waste. Therefore, researchers aim to develop more efficient water softening methods.

The potential of electrochemical methods for water softening has been known for a long time. A key feature of these technologies is the use of electrolyzers of various designs equipped with diaphragms or ion-exchange membranes [2] . However, despite the substantial number of scientific

publications, the practical application of this technology on an industrial scale remains limited. The main obstacle appears to be the high energy consumption required for large volumes of water and the low productivity of existing equipment.

In systems with low and medium productivity (such as domestic or office-scale units), lower electricity consumption and relatively small water volumes make it worthwhile to reconsider the use of electrochemical methods in this area. Therefore, the main objective of our study was to determine the feasibility and effectiveness of using electrolyzers of the appropriate design for water softening in low- and medium-capacity systems.

Electrochemical water softening involves the manipulation of the pH level in the compartments of a two-chamber electrolyzer equipped with a diaphragm. During electrolysis, a decrease in pH is observed in the anodic compartment, while a significant increase occurs in the cathodic compartment. Since electrolysis does not lead to the formation of compounds that can interact with hardness ions to produce insoluble precipitates, the main mechanism for hardness reduction lies in pH adjustment, i.e., the hydrolysis of these ions and their transformation into hydroxide forms [3].

Our experiments, based on pH regulation of the solution and separation of the resulting solid phase through filtration (Figure 1), demonstrated that magnesium ions undergo hydrolysis within a well-defined pH range. Specifically, at an initial magnesium hardness of 23 mg-eq/dm³, a reduction in residual hardness of the alkali-treated solution is observed only at pH ≥ 9.5, while a pronounced softening effect is recorded only at pH 11–11.5. Unfortunately, magnesium ions do not form low-solubility compounds with carbonate anions; therefore, under these conditions, carbonate has virtually no impact on their removal. Consequently, to effectively soften water with high magnesium hardness, it is necessary to maintain the pH in the cathodic compartment within the range of 11–11.5.

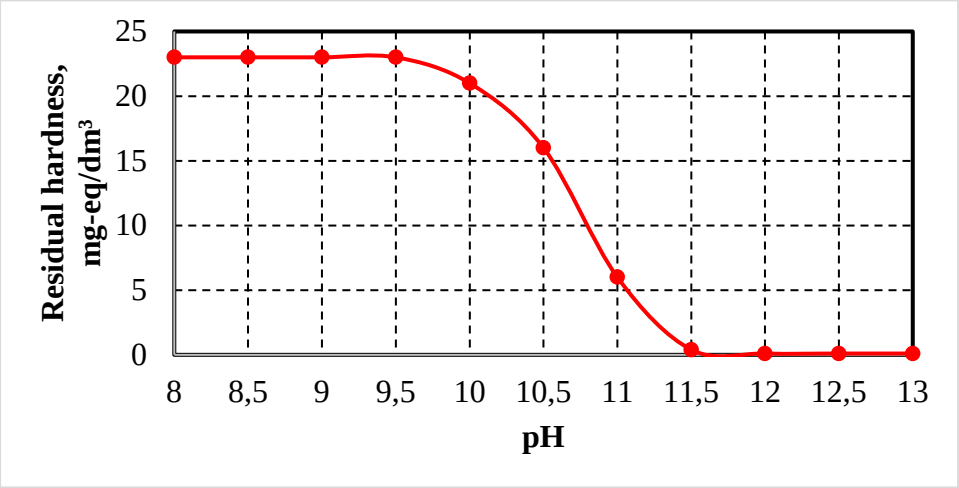


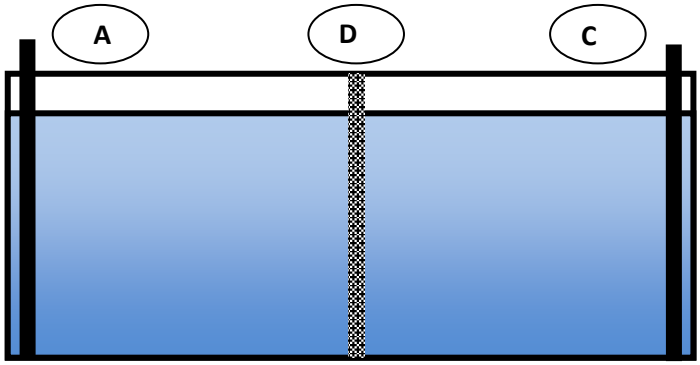
Fig. 1. *Degree of magnesium ion removal depending on pH level*

The efficiency of magnesium ion removal by the electrochemical method was studied using a two-chamber electrolyzer with a diaphragm made of "chlorinol" fabric, a lead anode, and a stainless-steel cathode, each with an area of 25 cm². The distance between the electrodes was 3 cm (Figure 2). Model solutions of varying concentrations were prepared based on $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. The electrolyzer was powered by a stabilized DC voltage source ranging from 0 to 15 V.

The experiments demonstrated that, under appropriate conditions, results meeting the requirements of current regulatory standards can be achieved. For instance, at an initial magnesium hardness of 10.0 mg-eq/dm³, a sufficient pH level for the formation of magnesium hydroxide is reached in the cathodic compartment after 10–20 minutes of electrolysis (Figure 3). This pH level is maintained for

approximately 20 minutes before beginning to decrease due to the formation and precipitation of magnesium hydroxide. In the anodic compartment, pH stabilizes after about 10 minutes and remains relatively constant throughout the electrolysis process.

As the initial hardness of the solution increases, the time required to reach the target pH in the cathodic compartment also increases. At a hardness of 20.0 mg-eq/dm³, the necessary treatment duration is 30 minutes, while at 30.0 mg-eq/dm³, the required pH level is not achieved even after 60 minutes of electrolysis.



A – anode; C – cathode; D – diaphragm.

Fig. 2. *Two-chamber electrolyzer used for studying changes in solution parameters during electrolysis*

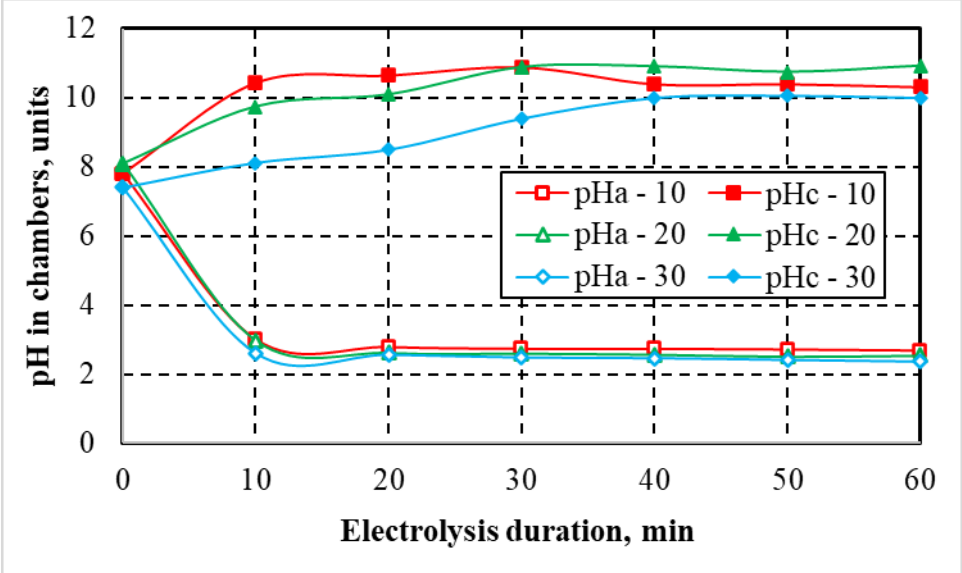


Fig. 3. *pH variation in the cathodic (pHc) and anodic (pHa) chambers over time during electrolysis at different initial Mg^{2+} concentrations: 10; 20; 30 mg-eq/dm³; U = 15 V*

A more critical parameter is the level of residual hardness after solution treatment. To assess it, the model solutions were filtered using "white ribbon" filter paper and analyzed for magnesium ion content. As shown in Figure 4, a decrease in hardness is recorded in both the cathodic and anodic compartments. It is evident that, during prolonged electrolysis, a portion of the magnesium ions diffuses through the diaphragm into the cathodic compartment, where they are converted into magnesium hydroxide. This is confirmed by the similar trend observed in the residual hardness curves in the anodic compartment over time.

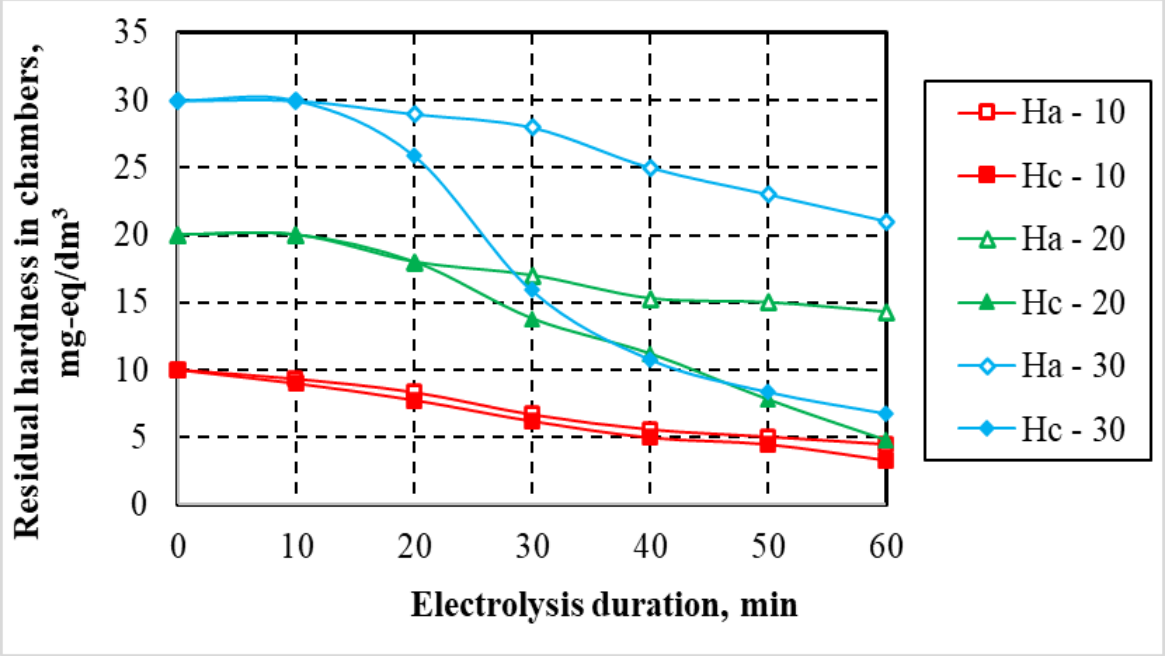


Fig. 4. *Residual hardness in the cathodic and anodic chambers over time during electrolysis at different initial Mg^{2+} concentrations: 10; 20; 30 mg-eq/dm³; U = 15 V*

At a low initial magnesium hardness (~10 mg-eq/dm³), the graphs showing hardness reduction over the course of electrolysis are nearly identical for both compartments, and the target hardness level of 7 mg-eq/dm³ is achieved within 25 minutes. Meanwhile, as shown in Figure 4, at higher initial hardness values, this standard level is barely reached even after 60 minutes, which is likely due to the tendency of magnesium hydroxide to form supersaturated solutions and the presence of a prolonged induction period [4].

Increasing the initial hardness of the solution to 20 mg-eq/dm³, and especially to 30 mg-eq/dm³, results in a significant change in the shape of the curves. The reduction in hardness in the anodic compartment increasingly lags behind that in the cathodic compartment. This suggests that, under identical electrolysis conditions, approximately the same amount of magnesium ions migrates through the diaphragm, leading to similar trends in residual hardness in the anodic compartment.

When a stabilized DC voltage of 15 V is applied to the electrodes, the hydrolysis of magnesium ions reduces the solution's conductivity, which in turn leads to a significant change in current density (Figure 5). It appears that under stable water composition, the extreme nature of this dependence could be used to monitor the electrolysis process. However, due to the unstable position of the extremum on the curves depending on the initial magnesium hardness, using this method to control the softening process in waters of varying composition is rather questionable.

Thus, the conducted studies demonstrated that electrolysis of water with a magnesium hardness level of 30 mg-eq/dm³ can yield satisfactory results if the treatment duration is up to 60 minutes. For lower initial hardness levels, this time can be reduced to 10–20 minutes. The initial concentration of magnesium ions determines the required electrolysis duration to achieve the regulatory standard of 7 mg-eq/dm³.

A reduction in water hardness is observed in both the cathodic and anodic compartments. In the latter, this effect is due to the diffusion of magnesium ions through the diaphragm into the cathodic chamber. During electrolysis, the concentration of magnesium in the cathodic compartment

decreases, leading to a corresponding reduction in current density on the electrodes.

Since the extreme change in current density significantly depends on the initial hardness of the water, using this parameter to control the electrolysis process appears questionable. The obtained results encourage further research focused on improving the design of electrolyzers, adjusting current density, and employing alternative electrode materials.

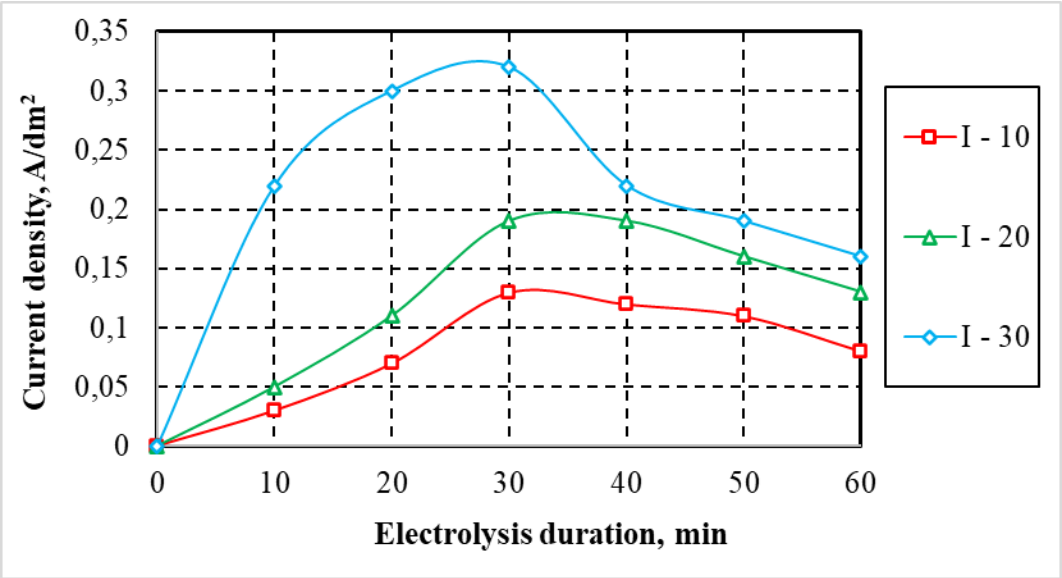


Fig. 5. *Change in current density during electrolysis at different initial Mg^{2+} concentrations: 10; 20; 30 mg-eq/dm³; U = 15 V*

References

1. Radovenchyk I., Gordienko K., Radovenchyk V., Krysenko T. The specicfics of chemical sedimentation of calcium ions from aqueous solution // Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving», 2022, №2 (21), p. 72-78.

2. Honcharuk V. V., Kucheruk D. D., Skubenko V. F., Badekha V. P., Kochkodan V. M. Prospect of baromembrane desalination of brackish waters of south of Ukraine // Desalination, 2001, Vol. 139, p. 327-331.

3. Filipchyk V. Electrochemical water softening in electrolyzer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017, – No 2/6 (86), p. 16-24.

4. Honcharuk V. V., Chebotaryova R. D., Bahriy V. A. et al. Water softening in an electrolyzer with a ceramic membrane. Chemistry and Water Technology, 2005, Vol. 27, No. 5, pp. 460–470.

ВИДАЛЕННЯ ІОНІВ МАГНІЮ З ВОДИ В ЕЛЕКТРОЛІЗЕРАХ З ДІАФРАГМОЮ

Богдан ВОЩЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056, м. Київ,Україна
https://orcid.org/0009-0002-6502-0910

Вячеслав РАДОВЕНЧИК
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056, м. Київ,Україна
https://orcid.org/0000-0001-5361-5808

Олексій ТОМІН
Університет Аалто
Otakaari 1, 02150 Espoo, Фінляндія
https://orcid.org/0000-0002-9927-6984

Анотація

У роботі наведено результати дослідження можливості застосування процесу електролізу в двокамерних електролізерах з діафрагмою для зниження магнієвої жорсткості водних розчинів. Встановлено, що проведення електролізу протягом 10–60 хв дозволяє знизити початкову жорсткість води з 10–30 мг-екв/дм³ до рівня 7 мг-екв/дм³, допустимого згідно з чинними нормативними документами для води, призначеної для споживання людиною. Основним чинником зниження жорсткості розчинів є зростання водневого показника в катодному відділенні. Деяке зниження жорсткості зафіксовано і в анодному відділенні, ймовірно, внаслідок дифузії іонів магнію через діафрагму в катодне відділення. При живленні електролізера від стабілізованого джерела постійної напруги зафіксовано екстремальну зміну щільності струму на електродах у процесі електролізу, спричинену зміною провідності розчину в катодному відділенні. За сталого хімічного складу води цю залежність можна використовувати для контролю перебігу процесу електролізу. Отримані позитивні результати стимулюють подальші дослідження в цьому напрямі.

Ключові слова: електроліз, пом'якшення води, магнієва жорсткість, іони магнію (Mg^{2+}), гідроксид магнію ($Mg(OH)_2$), двокамерний електролізер з діафрагмою, pH (водневий показник), осадження, фільтрація, щільність струму.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330415

ТЕХНОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВИКИДІВ ДІОКСИДУ СІРКИ ВІД СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ БАСЕЙНІВ УКРАЇНИ

Валерій ГАЄВСЬКИЙ, Віктор ФИЛИПЧУК,
Олексій ГАРАЩЕНКО, Людмила СОЛЯК
Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, 33000 Рівне, Україна
e-mail: v.r.haievskyi@nuwm.edu.ua

Анотація

У роботі виконано техноекологічну оцінку викидів діоксиду сірки від спалювання вугілля західної України, Львівсько-Волинського, Дніпровського та Донецького басейнів. Розрахунки виконані для модельної теплоелектростанції (ТЕС), потужністю 2,5 *ГВт і коефіцієнтом корисної дії 40%. На основі балансових співвідношень та з врахуванням технологічних особливостей поглинання* SO_2 *при спалюванні вугілля, пораховано річну кількість викидів і встановлено, що найбільш техноекологічним вугіллям з точки зору викидів* SO_2 *є вугілля Дніпровського вугільного басейну Новодніпровського родовища марки Б1Р та вугілля Донецького басейну марки АСШ.*

Ключові слова: *техноекологія, вугільні басейни України, вугільні теплові електростанції, контамінаційний еквівалент енергії, розрахунок шкідливих викидів.*

Актуальність даного дослідження зумовлена тим, що вугільна теплоенергетика є однією з найбільш екологічно небезпечних галузей промисловості [1]. Її функціонування передбачає спалювання значних обсягів вугілля, що супроводжується масовими викидами шкідливих речовин, зокрема твердих частинок (золи), NO_2, SO_2, CO, CO_2, а також теплового забруднення [2]. Серед цих викидів, окрім вуглекислого газу, особливо небезпечним є діоксид сірки, який негативно впливає як на здоров'я людини, так і на рослинність [3].

У зв'язку з цим метою роботи є оцінка промислових викидів теплоенергетичних підприємств під час спалювання вугілля різних марок і класів, що, у свою чергу, сприятиме розробленню ефективних заходів захисту навколишнього середовища [4].

У даній роботі виконаноно розрахунок викидів діоксиду сірки для вугільних басейнів України на прикладі ТЕС потужністю 2500 МВт [5]. Слід зазначити, що у цьому дослідженні не враховали попереднє очищення димових газів від сірки, що традиційно присутнє на ТЕЦ, оскільки оцінювалися максимальні можливі викиди SO_2. Проте результати можуть бути адаптовані для конкретних технологій сіркоочищення. Залежно від рівня технологічної досконалості, сучасні системи дозволяють знижувати викиди SO_2 на 95% (дешеві установки) до 99% (високоефективні, дорогі системи), які все активніше впроваджуються у вугільній теплоенергетиці згідно з чинними екологічними вимогами [4].

Масову кількість викидів SO_2 – $M_{тв}$ за відсутності сіркоочищення визначали за вихідними даним палива [6] (див. табл.1 та рис.1) за співвідношенням:

$$M_{тв} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot B \cdot S^p \cdot (1 - \eta') \cdot (1 - \eta''),$$

де:

B — витрата палива, (од. маси)/(од. часу);

S^p — вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

η' — частка SO_2, що зв'язується леткою золою в котлі (для сучасних вугільних котлів прийнято усереднене значення 0,1%);

η'' — частка SO_2, що уловлюється у вологому золовловлювачі та залежить від приведеної сірчаності палива S_p/Q_p, де Q_p — теплота згоряння палива на робочу масу, МДж/кг. Цей показник прямо не пов'язана із процесом сіркоочищення, а відображає побічний ефект у процесі видалення золошлакових залишків. Значення η'' розраховувалося для води зрошувальної системи з лужністю 5 ммоль/дм³.

Для техноекологічної оцінки було використано контамінаційний еквівалент енергії — негативний індикатор, який відображає співвідношення між кількістю викинутого діоксиду сірки та кількістю згенерованої електричної енергії [7].

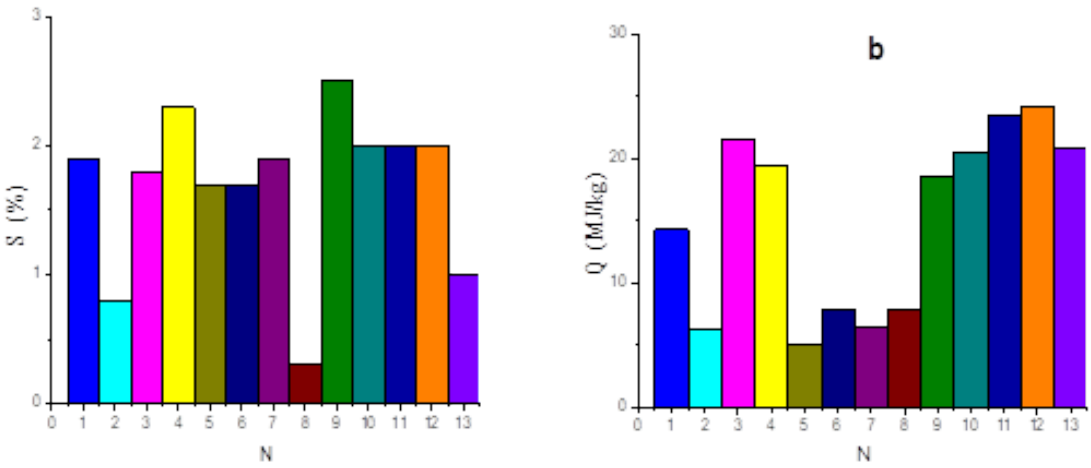


Рис. 1. *Вмісь сірки (a) та питома теплота згоряння (b) для вузілля басейнів України*

У табл. 2 приведені розрахунки максимальних річних викидів (без врахування сіркоочищення димових газів) діоксиду сірки від спалювання вугілля різних регіонів України.

Із табл. 2 і рис. 2 видно, що найбільш техноекологічним по відношенню до викидів SO_2 є вугілля Дніпровського вугільного басейну Новодніпровського родовища марки Б (буре вугілля) та вугілля Донецького басейну марки А (антрацит).

Табл. 1. Фізико-хімічні показники вугілля басейнів України

Басейн / родовище	**Західна Україна**		**Львівсько-Волинський**		**Дніпровський**				**Донецький**				
	Коломийське	**Ільницьке**	**Волинське**	**Міжріченське**	**Семенівське, Олександрійське, Юрківське, Бандурівське**		**Буре вугілля**	**Новодніпровське**					
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Марка, клас	Б	Б	Г	Ж	Б	Б шахт.	Б	Б	Д	Г	Ж	П	А
Робоча маса, %: S^p_0	1,9	0,8	1,8	2,3	1,7	1,7	1,9	0,3	2,5	2,0	2,0	2,0	1,0
Q^p_h, МДж/кг	14,27	6,28	21,44	19,38	4,98	7,79	6,45	7,91	18,5	20,47	23,36	24,08	20,89

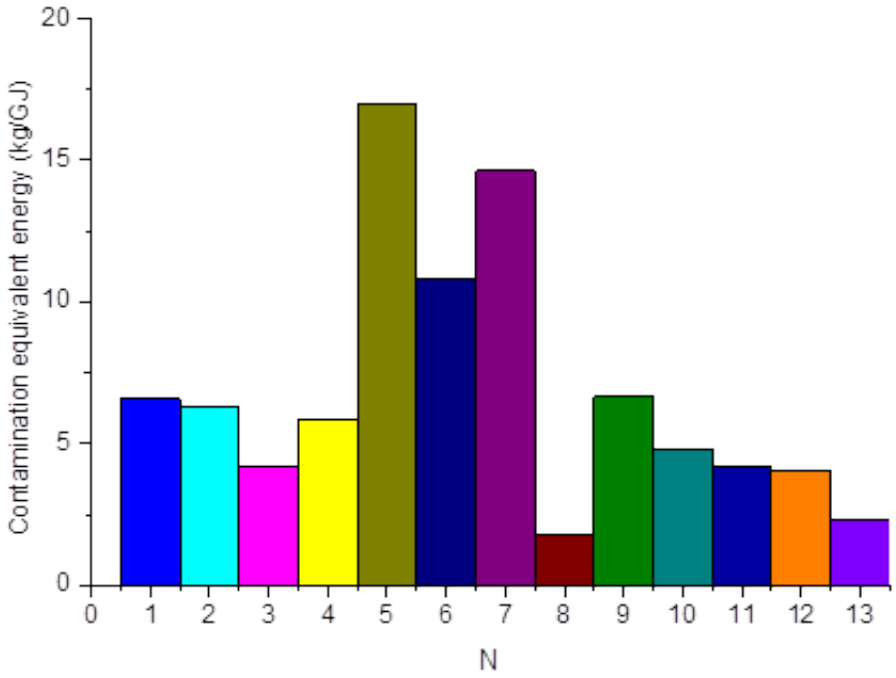


Рис. 2. *Контамінаційний еквівалент енергії для вугілля басейнів Україна*

Табл.2. Річні викиди діоксиду сірки для різного вугілля України. N – означено у табл. 1

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Марка, клас	Б	Б	Г	Ж	Б	Б шахт.	Б	Б	Д	Г	Ж	П	А
Викиди SO_2, тис.тон/рік	455	438	303	412	885	672	818	144	460	347	308	300	180

Висновки

Таким чином у роботі виконаний порівняльний аналіз максимальної кількості генерації діоксиду сірки без врахування сіркоочищення димових газів і показано, що з точки зору техноекологічної оцінки викидів SO_2 найбіль техноекологічно сприятливим у використанні є вугілля Новодніпровського родовища марки Б (буре вугілля) та вугілля Донецького басейну марки А (антрацит).

Література

1. Варламов, Г.Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії [Текст] / Г.Б. Варламов, Г.М. Любчик, В.А. Маляренко. - К.: Політехніка, 2003.- 232 с. ISBN 966–622–128–4

2. Любчик Г.М. Методологія екологічного аналізу енергетичних об'єктів, систем і територій [Текст] / Г.М. Любчик, Г.Б. Варламов, Р.М. Говдяк та ін. // Енергетика та електрифікація.- 2005.- № 3.- С. 50-55.

3. Сябер М.О., Долгополов В.М. Проблема утилізації золи вугільних ТЕС та очищення димових газів // Енергетика та електрифікація. – 2013.–№10.

4. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І. та ін. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України.– Київ: Гнозіс. 2013. – 308 с.

5. Филипчук В.Л., Гаєвський В.Р., Екологічна оцінка методів очищення димових газів ТЕС від діоксиду сірки. Збірник матеріалів. III Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Науково-інноваційний супровід збалансованого природокористування» присвячена пам'яті та 95-річчю з Дня народження професора С.Т. Вознюка: Матеріали конференції 29-30 вересня 2022 р. Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування, Україна. С. 27 – 28. ISBN 978-966-327-446-1.

6. Мала гірнича енциклопедія, т. 1 / За редакцією В.С.Білецького. — Донецьк: Донбас, 2004. ISBN 966-7804-14-3.

7. Гаєвський В.Р., Филипчук В.Л. Вплив ефективності роботи оборотних систем охолодження ТЕС на величину викидів діоксиду сірки. Збірник матеріалів. I Міжнародна науково-практична конференція «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій»: збірник матеріалів 26 – 27 травня 2022 р. Полтава – Львів, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна. С. 159 – 161. https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2022/i-mnpk-podolannia-eko-rizikiv/zbirnik-materialiv.pdf.

TECHNO-ECOLOGICAL ASSESSMENT OF SULPHUR DIOXIDE EMISSIONS FROM COAL COMBUSTION IN UKRAINIAN BASINS

Valery GAYEVSKII
National University of Water and Environmental Engineering
Soborna 11 str., 33000 Rivne, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-4180-7436

Viktor FYLYPCHUK
National University of Water and Environmental Engineering
Soborna 11 str., 33000 Rivne, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-5763-5398

Oleksiy GARASHCHENKO
National University of Water and Environmental Engineering
Soborna 11 str., 33000 Rivne, Ukraine
https://orcid.org/0009-0007-0366-256X

Ludmila SOLIAK
National University of Water and Environmental Engineering
Soborna 11 str., 33000 Rivne, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-6919-9527

Abstract

The presents a technoecological assessment of sulfur dioxide emissions from coal combustion in Western Ukraine, Lviv-Volyn, Dnipro and Donetsk basins. Calculations were made for a model thermal power plant (TPP) with a capacity of 2.5 GW and an efficiency of 40%. Based on balance ratios and taking into account the technological features of SO_2 absorption during coal combustion, the annual emissions were calculated and it was established that the most technoecological coal in terms of SO_2 emissions is coal from the Dnipro coal basin of the Novodniprovske deposit of the B1R brand and coal from the Donetsk basin of the ASSH brand.

Key words: technoecology, coal basins of Ukraine, coal-fired thermal power plants, contamination equivalent of energy, calculation of harmful emissions.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330359

STUDY OF THE KINETICS OF THERMAL DECOMPOSITION OF LINDEN WOOD USING THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS IN AN AIR ATMOSPHERE

Liudmyla HAPONYCH, Oleksandr TOPAL, Iryna HOLENKO, Maksym LIUBARETS
Thermal Energy Technology Institute of The National Academy of Sciences of Ukraine
19, Andriyvska str., 04070, Kyiv, Ukraine
e-mail: haponych@ukr.net

Abstract

The article investigates the kinetics of thermal decomposition of linden wood using TGA in air at a heating rate of 10–30 °C/min. Temperature ranges and mass loss were determined for the stages of dehydration, pyrolysis, and combustion of the carbon residue. It is shown that biomass decomposition occurs through the decomposition of hemicellulose, cellulose, and lignin, that constitute its composition. The influence of the heating rate on the temperature of maximum mass loss, which ranges from 350 °C to 370 °C corresponding to cellulose decomposition, was studied. Kinetic parameters of pyrolysis and for individual stages of hemicellulose and cellulose decomposition were calculated using the Coats-Redfern method.

***Key words**: biomass, linden wood, pyrolysis, volatiles, coke residue, TGA, chemical kinetics, reaction rate constant, activation energy.*

Replacing fossil fuels with renewable alternatives, including those derived from biomass, is one of the key elements of many national decarbonization strategies. The draft National Action Plan for the Development of Renewable Energy up to 2030 sets an indicative target to triple the share of energy from renewable sources in final energy consumption – from 9% in 2020 to 27% in 2030, including reaching 25% in the electricity sector. Additionally, substituting scarce organic fuels, primarily coal and gas, during the martial law period at industrial facilities with renewables is **extremely relevant**. It should be noted that the Russian invasion of Ukraine has caused massive disruption of economic activity links and destruction of the fuel and energy infrastructure of Ukraine. According to the Recovery and Development Plan of Ukraine proposed by the government and president of Ukraine, the development of renewable energy is of key importance for shaping the future structure of Ukraine's power generation capacities. The implementation of this plan is a chance to restore the war-inflicted damages. The growth of renewable fuels usage, including various types of biomasses, is envisaged in Ukraine's Energy Strategy through 2035.

Waste-to-energy (WTE) technologies are rapidly developing today, offering the potential to generate renewable energy from biomass, including agricultural and processing industry wastes [1]. The improvement of existing and development of new WTE technological systems for burning biomass, including wood-processing industry waste, should be based on an understanding of the

patterns of thermal processing of such fuels [2]. **The aim of this work** is to study the patterns of thermal decomposition of biomass samples.

Significant attention in the design of furnace devices is devoted to the process of combustion of particles of the original fuel. The burning of solid organic fuel is a complex physico-chemical process, which is conventionally divided into several main stages. The first stage is the pyrolysis of the fuel particle, which includes its heating, drying, formation, and release of volatiles. The second stage is the combustion of volatiles and the coke residue, including their ignition. These stages differ in speed, duration, and impact on the combustion process depending on technological conditions [3, 4].

Pyrolysis is a process of thermal decomposition of the fuel, resulting in the formation (synthesis) of volatile substances (mainly H_2, CH_4, CO, CO_2, smaller amounts of C_2H_6, C_2H_4, high-gas organic compounds, and water vapor), solid coke residue, and liquid products (resins) [5, 6]. This process involves multiple phases, complex chemical pathways, unstable intermediate products, and the effects of heat and mass transfer. The quantitative and qualitative composition of the products formed depends on the type of fuel, final pyrolysis temperature, heating rate and particle size, reactor pressure, residence time of particles in the reactor, conditions of volatiles evacuation, and the composition of the surrounding gas environment.

All types of biomas are fuels with a high volatile content (about 80–85% on a dry, ash-free basis), which is why pyrolysis is the most important process for the thermal treatment of such fuels. The yield of volatile substances can significantly affect the subsequent ignition of the coke residue. With a high yield of volatiles, the combustion process proceeds faster, and their gaseous and liquid contents influence the burning rate. The heating rate of the fuel during pyrolysis determines the ratio of volatile output to coke residue.

The following stages of pyrolysis of the solid fuel are distinguished: breaking of the weakest intramolecular bonds, intramolecular rearrangements, release of sorbed gases (at temperatures up to 200 °C); absorption of energy to enhance thermal vibrations of molecules (200–350 °C); predominance of decomposition reactions, change in the aggregate state of the coal substance (350–450 °C); release of tars, hardening of the plastic mass, dominance of synthesis reactions (450–550 °C); combination of large radical fragments in the solid phase, intensive gas release of vapors and tarry substances (> 550 °C) [3, 4].

During slow heating, the molecular bonds of the organic substance break sequentially, starting from the weakest. The typical order of volatile release is as follows: first, the release of sorbed gases occurs, followed by the destruction and synthesis of water vapor and CO_2, then CH_4, CO, aliphatic hydrocarbons, tars, and H_2. The combustion of coke residue is generally the longest stage and is accompanied by the interaction of oxygen O_2, carbon dioxide CO_2, water vapor H_2O, and to a lesser extent hydrogen H_2 with the external and internal surface of the particle. The primary products of the heterogeneous interaction of carbon C with O_2 are both CO and CO_2, and the overall reaction is represented as: $(1+m)\cdot C+(m/2+1)\cdot O_2 \rightarrow m\cdot CO+CO_2$, where m characterizes the completeness of carbon combustion to CO_2: at m = 0 – the reaction product is only CO_2; at m >>1 – CO.

The ratio of primary CO/CO_2 increases with rising temperature and decreasing pressure and can be represented in an Arrhenius form: $m = CO/CO_2 = A\exp(-E_a/RT)$, where A is a constant determined experimentally; E_a is the activation energy, J/mol; R = 8.31 kJ/(kmol ·K) – is the universal gas constant; T is the temperature, K.

The main reactions of oxygen interaction with carbon occurring on the particle and pore surfaces are: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ + 395 kJ/mol, $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ + 219 kJ/mol. It is considered that oxygen interaction does not occur over the entire accessible surface, but only at certain regions – active sites, whose presence is determined by carbon edges or dislocations, inorganic impurities, oxygen- or hydrogen-containing functional groups. The successive elementary stages of the reaction are:

physical and chemical adsorption of the gas, migration of the intermediate complex, desorption of reaction products. With a sufficient amount of oxygen in the gas phase, oxidation of pyrolysis products occurs: $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 571$ kJ/mol, $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 231$ kJ/mol, $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 892$ kJ/mol. The specified reactions proceed with significant heat release. Having different rates, they affect the combustion process differently. A distinctive feature of the $CO + O_2$ reaction is its sensitivity to water vapor. "Dry" oxidation of CO (in the absence of water vapor) is characterized by an extremely low reaction rate. "Wet" oxidation occurs much faster and is controlled by the following elementary step: $CO+OH \rightarrow CO_2+H$.

Biomass is a highly complex fuel in terms of composition, whose main organic components are cellulose, hemicellulose, and lignin [6]. Cellulose is a glucose polysaccharide with the formula $C_6H_{10}O_5$, featuring a cyclic structure with high stability due to hydrogen bonds [7]. Hemicellulose is a heteropolysaccharide, often represented as $(C_5H_8O_4)n$. It is an amorphous, thermally softening organic polymer that decomposes quickly at moderate temperatures and consists of various monosaccharides such as xylan [6]. Lignin is a large, hydrophobic, aromatic polymer with phenolic linkages, having the formula $[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0.9\ldots1.7}]n$. It provides structural support to cellulose and hemicellulose within plant cells [8]. Overall, cellulose makes up 35–55% of biomass, hemicellulose 23%–32%, and lignin 15%–25% [9]. The content of other components, specifically inorganic and extractive substances, accounts for 5–13% [10]. The content of each component varies depending on the type of biomass and its part, for example, stems or sunflower husks, which affects their combustion temperature and chemical composition [11]. In woody biomass, cellulose content ranges between 40% and 60%, while lignin content varies from 21% to 30% [12].

Thermal decomposition of biomass occurs as a result of the breakdown of polymer chains (cellulose, lignin, hemicelluloses) that make up its structure. The process of thermal degradation of cellulose begins at temperatures above 240 °C and is fully completed at around 450 °C [5, 12]. Hemicelluloses thermally degrade within the temperature range of 200 °C to 260 °C. Thermal degradation of lignin starts at 200 °C, and between 225 °C and 450 °C, the reaction process becomes exothermic. Some additional studies have shown that lignin reaction begins at low temperatures, but pyrolysis can continue to higher temperatures [12, 13]. Thermal degradation of lignin produces 1.5 times more coke than cellulose [12]. Pyrolysis in wood typically starts at 200 °C and continues up to 450–500 °C, depending on the wood species. The actual reaction scheme of wood pyrolysis is extremely complex due to the formation of more than a hundred intermediate products.

Materials and methods

The experiments studied samples of linden wood chips. The averaged technical analysis of linden wood on a dry basis is as follows: $A^r = 0.3\%–0.5\%$, $V^r = 63\%–68\%$, $W^r = 20\%$, fixed carbon $C^r_f = 11\%–14\%$. The elemental composition of the fuel is $C^r = 39\%–41\%$, $O^r = 33\%–35\%$, $H^r = 5.5\%–6.0\%$, $N^r = 5.5\%–6.0\%$, and $S^r < 0.05\%$. The Lower Heating Value is 14.5–15.2 MJ/kg.

One of the reliable methods for studying the mechanisms of thermal conversion of solid fuels is thermogravimetric analysis (TGA), which allows for the assessment of mass loss, temperature ranges of reactions, and kinetic parameters. Research on the thermal conversion of fuel particle combustion was conducted by interacting their organic component with atmospheric oxygen at atmospheric pressure. The setup is based on a vertical cylindrical furnace with a height of $h = 0.4$ m and an internal diameter of $d = 0.12$ m (see Fig. 1).

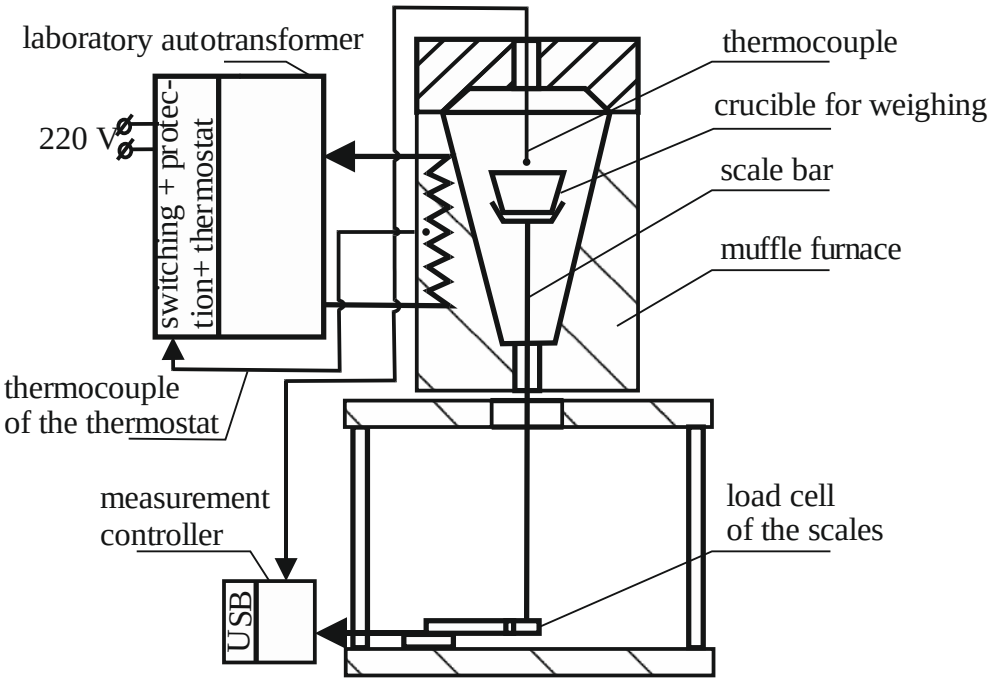


Fig. 1. *Schematic diagram of the setup for studying the thermochemical conversion of solid fuel*

The operation of the setup is based on the principle of TGA, that is, continuous recording of the change in mass of the solid fuel sample under study during the linear temperature change in the reaction zone under conditions of natural convection of the gas reagent. The maximum furnace operating temperature is up to 1000 °C. Depending on the sample density, samples weighing up to 3–5 g can be studied with an accuracy of 0.001 g.

The procedure for conducting a TGA experiment is as follows. The fuel sample, ground to the required size, is weighed and placed in the cold furnace. After placing the studied fuel charge, the furnace lid is closed and heating is turned on to the temperature set by the thermostat. After reaching temperatures significant for the experiment (depending on the sample material, usually 30–40 °C), recording of temperature T, °C, and mass change m, mg, begins in a file on the PC. The temperature range was from 30 °C to 800 °C. Data recording is stopped after the change in sample mass stabilizes (its burnout). Result: we have dependencies of mass and temperature as a function of time τ, s. The availability of primary data in the form of dependencies $m = f(\tau)$ and $T = g(\tau)$ allows obtaining data in the form of $m = g(T)$, $W = \mathrm{dm}(\tau)/\mathrm{d}\tau$, i.e., the reaction rate, and many others needed to determine the kinetic/dynamic characteristics according to the selected models. Linden wood samples were studied in an air atmosphere at three heating rates: 10, 20, and 30 °C/min. TGA curves were constructed for each case.

Processing of Experimental Data. TGA data can be analyzed to obtain the kinetic parameters of the thermal decomposition of solids, in our study of linden wood, specifically the activation energy E_a, kJ/mol and pre-exponential factor A, s^{-1}. The degree of conversion at time τ (indicating the fraction of the experimental sample that has reacted by time τ) is determined by the formula $\alpha = \frac{m_0 - m_\tau}{m_0 - m_\infty}$, where m_0 is the initial mass of the sample; m_∞ is the final mass at the stage of thermal decomposition; mτ is the current mass of the sample. The change in the degree of fuel conversion α as a function of time τ is described by an Arrhenius-type equation: $\frac{d\alpha}{d\tau} = \mathrm{A}\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha)$, where $f(\alpha)$ is a function characterizing the reaction model [14, 15].

In non-isothermal TGA experiments, the heating rate is also a function of time, expressed in the following form: $\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{d\alpha}{dT}\frac{dT}{d\tau}$. For non-isothermal measurements, the linear heating rate β (°C/s) can be defined as $\beta = dT/d\tau$. It can be written as: $\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{d\alpha}{dT}\beta$, or $\frac{d\alpha}{dT}\ \beta = \mathrm{A}\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha)$.

This equation is known as the general equation of the TGA curve. We separate the variables and obtain: $\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{\mathrm{A}}{\beta}\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dT$. We integrate the last equation taking into account that $g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)}$: $g(\alpha) = \frac{\mathrm{A}}{\beta}\int_{T_0}^{T} exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dT$. Using the transformations given in [14], it can be written as: $\int_{T_0}^{T} exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dT \approx \frac{R}{E_a}T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$, or $g(\alpha) = \frac{\mathrm{AR}}{\beta E_a}T^2\left(1-\frac{2RT}{E_a}\right)\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$. If the last equation is integrated using the Cotes and Redfern method [14, 15], one can obtain: $ln\frac{g(\alpha)}{T^2} = ln\frac{\mathrm{AR}}{\beta E_a}\left(1-\frac{2RT}{E_a}\right) - \frac{E_a}{RT}$. e magnitude of $2RT/E_a$ is negligible compared to one for the thermal decomposition of lignocellulosic materials, so the plot of $\ln[g(\alpha)/T^2]$ versus $1/T$ will be linear with a slope of $-E_a/R$, since $\ln[AR/\beta E_a]$ remains almost constant. The functions $f(\alpha)$ and $g(\alpha)$ depend on the mathematical model of each transformation mechanism. Using the appropriate $g(\alpha)$, the plot of $\ln[g(\alpha)/T^2]$ versus $1/T$ demonstrates linearity with a high coefficient of determination (R_2) in the regression analysis, allowing for the determination of the activation energy and the pre-exponential factor.

For different reaction orders n and models, $f(\alpha)$ is a tabulated function: for $n = 1$ $f(\alpha) = 1-\alpha$ [14, 15]. For $n = 1$, we will write the last equation as follows: $\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} = \frac{\mathrm{AR}}{\beta E_a}\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$. We logarithmise and get: $\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right] = ln\frac{\mathrm{AR}}{\beta E_a} - \frac{E_a}{RT}$. or $n\neq 1$ $g(\alpha) = \frac{(1-\alpha)^{-(n-1)}-1}{n-1}$.

Results and discussion

Figure 2 shows the typical dependence of the degree of conversion α on temperature T for different heating rates. The thermodestruction process occurs in several stages.

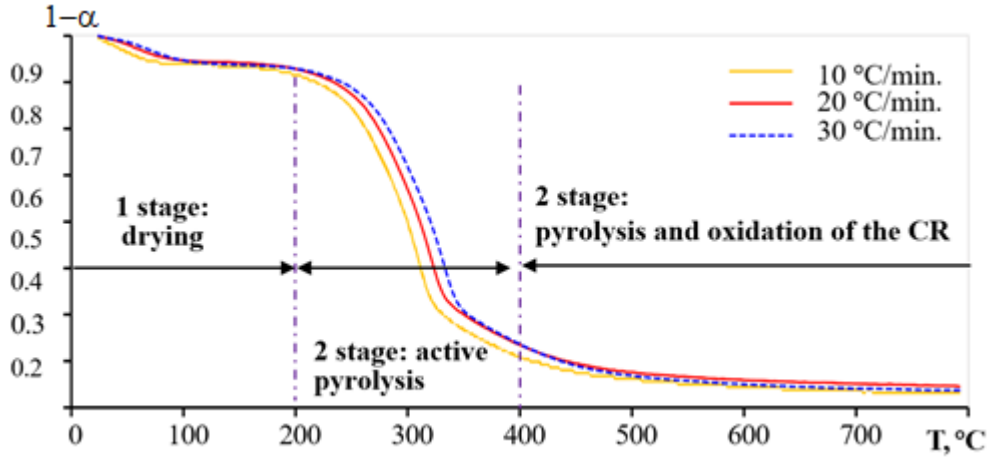


Fig. 2. *Typical dependence of the conversion degree α on T for different heating rates*

Dehydration (drying) – dehydration of low-molecular-weight components, removal of physically bound water (up to 150–200 °C): mass loss ~ 5%.

Pyrolysis at 200–405 °C – active pyrolysis. Decomposition of hemicellulose (200–280 °C) – release of CO, CO_2, and water vapor; mass loss ~ 10%–15%. Decomposition of cellulose (290–

400 °C) – numerous reactions involving the cleavage of C–C and C–O bonds and radical reactions forming gases or volatile compounds, mainly due to the breakdown of higher carbohydrates; primary stage of volatile formation, tar, and condensed hydrocarbons; mass loss ~ 60%–70%. This correlates with the cellulose content in the wood being up to 60% [12]. Beginning of lignin decomposition.

Pyrolysis and oxidation of the carbon residue (CR). Lignin decomposition (350–550 °C) – slow breakdown into phenols, tars, and gaseous products; mass loss ~10%–15%. Oxidation of CR (> 500 °C): coke residue accounts for about 1%–2% of the initial mass.

Primary decomposition of biomass material starts with the degradation process (< 200 °C), while secondary pyrolysis (> 350–400 °C) includes aromatization processes. The most significant structural changes in biomass occur at 300–400 °C, characterized by a decrease in the intensity of C–O and C=C bonds and the formation of C–C bonds. With increasing temperature, there is a continuous decrease in the intensity of valence –OH bonds and an increase in the yield of aromatic compounds, peaking above 600 °C, which depends on the ratio of cellulose to lignin in the fuel.

With an increase in the heating rate from 10 to 30 °C/min: the pyrolysis temperature range shifts toward higher temperatures; the rate of mass loss increases; less carbon residue is formed due to more intensive oxidation. At the same time, the temperature at the maximum rate of pyrolysis for a heating rate of 10 °C/min is about 350 °C and shifts to higher values (~370 °C) at 30 °C/min.

Kinetic parameters for the main decomposition stage – active pyrolysis (200–405 °C) – have been determined. Results were obtained for n = 1: E_a = 68 kJ/mol, $A = 2.6\times10^3$ s^{-1} (R^2 = 0.84). The activation energy represents the minimum energy required to initiate the decomposition reaction – in this case, it indicates the moderate stability of the wood's organic structure. The reaction order, close to first order, suggests that the decomposition process is independent of the initial substance concentration. Kinetic parameters were also determined for the hemicellulose decomposition stage (200–280 °C) and for the cellulose decomposition stage (290–405 °C). Results were obtained for n = 1: E_a = 26 kJ/mol, $A = 2.6\times10^7$ s^{-1} (R^2 = 0.84) for 200–280 °C and E_a = 126 kJ/mol, $A = 3.1\times10^8$ s^{-1} (R^2 = 0.996) for 290–405 °C.

Conclusions

The pyrolysis of linden wood takes place in several stages with the predominant thermochemical decomposition in the temperature range of 200-405 °C. An increase in the heating rate from 10 to 30 °C/min leads to a shift in the maximum decomposition to higher temperatures and a decrease in the yield of coke residue.

The kinetic parameters of pyrolysis were calculated for individual stages of hemicellulose and cellulose decomposition using the Coates-Redfern method. The maximum activation energy (126 kJ/mol) and decomposition rate are achieved in the temperature range of 290-405 °C and correspond to the cellulose decomposition stage. The R_2 value for the cellulose decomposition stage is 0.996, indicating that the pyrolysis processes are well correlated.

References

[1] Haponych L. S.; Golenko I. L.; Topal A. I. Legislation, current situation and prospects of using municipal solid waste as energy resource in Ukraine. *The Problems of General Energy* **2019**, *3(58)*, 45-54. DOI: https://doi.org/10.15407/pge2019.03.045

[2] Topal A.; Holenko I.; Haponych L. Clean utilization of municipal solid wastes and alternative fuels derived from it. *Environmental Problems* **2020**, *5(40)*, 202-209. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2020.04.202

[3] Morgan T.; Kandiyoti R. Pyrolysis of Coals and Biomass: Analysis of Thermal Breakdown and Its Products. *Chemical Reviews* **2014**, *114(3)*, 1547–1607. DOI: https://doi.org/10.1021/cr400194p

[4] Kim H. J.; Kim L. H. Combustion and thermal decomposition characteristics of brown coal and biomass. *Journal of Energy Engineering* **2012**, *21(4)*, 373-377. DOI: https://doi.org/10.5855/ENERGY.2012.21.4.373

[5] Balat M.; Balat M.; Kırtay E.; Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management* **2009**, *50(12)*, 3147-3157. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.014

[6] Yaman S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management* **2004**, *45(5)*, 651-671. DOI: https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8

[7] Das, A.; Mondal, C.; Roy, S. Pretreatment methods of lignocellulosic biomass: A review. *Journal of Engineering Science and Technology* **2015**, *8*, 141-165. http://www.jestr.org/downloads/Volume8Issue5/fulltext85202015.pdf.

[8] Mankar, A. R.; Pandey, A.; Modak, A.; Pant, K.K. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology* **2021**, *334*, 125235. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235

[9] S. Hameed, A.; Sharma, V.; Pareek, H.; Wu, Y. Yu, A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models. *Biomass and Bioenergy* **2019**, *123*, 104-122. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.008.

[10] Madadi, M.; Abbas, A. Lignin degradation by fungal pretreatment: a Review. *J. Plant Pathol. Microbiol* **2017**, *8(2)*, 398. DOI: 10.4172/2157-7471.1000398

[11] Haponych, L., Topal, O., Holenko, I., Kobzar, S. Determination of the features of thermal decomposition of sunflower husk in a fluidized bed. *Vidnovluvana Energetika* **2024**, *2(77)*, 137-149. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).137-149

[12] Gvero, M.P.; Papuga, S.; Mujanić, I.; Vaskovic, S. Pyrolysis as a key process in biomass combustion and thermochemical conversion. *Thermal Science* **2016**, *20*, 1209-1222. https://doi.org/10.2298/TSCI151129154G

[13] Siau, J. F. Transport processes in wood. *IAWA Journal* **1984**, *5(3)*, 216-216. https://doi.org/10.1163/22941932-90000890

[14] Coats, A.; Redfern, J. Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data. *Nature* **1964**, 68-69. https://doi.org/10.1038/201068a0

[15] Fernandez, A.; Saffe, A.; Mazza G.; Rodriguez R. Nonisothermal drying kinetics of biomass fuels by thermogravimetric analysis under oxidative and inert atmosphere. *Drying Technology* **2017**, *35(2)*, 163-172. DOI: 10.1080/07373937.2016.1163265

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ДЕРЕВИНИ ЛИПИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОГРАВІМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ У ПОВІТРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Людмила ГАПОНИЧ
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
вул.Андріївська, 19, 04070, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-4611-3193

Олександр ТОПАЛ
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
вул.Андріївська, 19, 04070, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9458-9420

Ірина ГОЛЕНКО
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
вул.Андріївська, 19, 04070, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3487-8025

Максим ЛЮБАРЕЦЬ
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
вул.Андріївська, 19, 04070, Київ, Україна
https://orcid.org/0009-0003-3413-2511

Анотація

У статті досліджено кінетику термічного розкладання деревини липи методом ТГА у повітрі при швидкості нагрівання 10–30 °С/хв. Визначено температурні діапазони та втрати маси для стадій дегідратації, піролізу і допалення вуглецевого залишку. Показано, що розкладання біомаси відбувається через розпад полімерних ланцюгів геміцелюлози, целюлози, лігніну, що входять до її складу. Вивчено вплив швидкості нагрівання на температуру максимуму втрати маси, яка становить 350–370 °С і відповідає розкладанню целюлози. Розраховано кінетичні параметри піролізу та для окремих стадій розкладання геміцелюлози й целюлози, використовуючи метод Коутса-Редферна для оцінки енергії активації та передекпоненційного множника.

Ключові слова: біомаса, деревина липи, піроліз, леткі, коксовий залишок, TGA, хімічна кінетика, константа реакції, енергія активації.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331333

NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB) – A SUSTAINABLE FUTURE FOR THE BUILT ENVIRONMENT AND BULGARIAN EXPERIENCE

Krasimir G. GEORGIEV
Institute of Mechanics- Bulgarian academy of sciences
Acad. G. Bontchev St., bl. 4,1113 Sofia, Bulgaria
e-mail: krasimir.georgiev@imbm.bas.bg

Abstract

The concept of Nearly Zero-Energy Buildings (NZEBs) represents a transformative shift in the design, construction, and operation of buildings, aiming to significantly reduce energy consumption and environmental impact. The revised Energy Performance of Buildings Directive (EU/2024/1275) [1] requires all new buildings to meet higher levels of performance than before, by exploring more the alternative energy supply systems available locally on a cost-efficiency basis and without prejudicing the occupants 'comfort.

As global concerns about climate change, energy security, and resource depletion intensify, the building sector, which accounts for approximately 30–40% of global energy consumption and associated greenhouse gas (GHG) emissions, has come under increasing scrutiny. NZEBs are designed to minimize energy demand through high-efficiency systems and passive design strategies while meeting the remaining energy needs through renewable energy sources produced on-site or nearby.

In this context we are going to share the Bulgarian experience and show several examples of such buildings from Bulgaria.

Keywords: *Nearly Zero-Energy Buildings, NZEB, energy efficiency, sustainable architecture, renewable energy, building design, passive house, smart buildings, net-zero, green construction.*

Introduction

Climate change and all its consequences are priority issues, especially in the last few decades. Buildings (commercial, residential) are major contributors to energy consumption. Energy consumption in buildings is increasing significantly annually due to the increasing population, the need for more living space, and the needs and services for human comfort. Many factors influence the energy consumption used for heating and cooling buildings, such as the structure of the wall, the window/wall ratio, the orientation of the building, and the weather conditions. However, the current scenario of building construction and the way it is operated and maintained have a significant impact on the total energy and water use of the world's resources. Reducing energy use in buildings and homes will significantly reduce energy consumption and consequently greenhouse gas emissions.

The European Unions' ambition for improvements in the construction sector is to be carbon neutral by 2030 for all new buildings, both office and residential. All of the new buildings in the EU

should have been constructed as nearly zero-energy buildings (nZEB) since 2021 [2]However, some Eastern European countries with very old and not efficient building stock that consists mainly from buildings from old concrete panels and not insulated buildings struggle to implement the 2018 Energy Performance of Building Directive recast requirements [3]. Next to the economic challenges, equally essential factors hinder renovating the existing residential building stock and adding newly constructed high-performance buildings sourced primarily from renewable energy sources.

Decarbonization of buildings and the construction sector is very critical to achieve the commitment of the Paris Agreement and to reach the United Nations Sustainable Development Goals. Last researches show that 40% of the total energy consumption and 36% of the CO_2 emissionsin Europe comes from buildings. Therefore, the EU has decided to take drastic measures in particular in the construction sector, as they are central to the EU's energy efficiency policy. This has led the European Commission to create Directives on Energy Efficiency which oblige the improvement of the energy efficiency of buildings, thus, introducing the concept of NZEB or Near Zero Energy Building. This desire is reflected in The European Commission's long-term strategy for 2050, which acknowledges the necessity of an almost complete decarbonization of the building sector to achieve its climate objectives. In this article, we explain what exactly an NZEB building is and its importance in sustainable development.

Before providing a more formal definition of what Near Zero Energy Buildings, more commonly known as NZEBs, it is important to clarify the confusion that these buildings do consume energy, but it also produces and stores energy. As for the nearly-zero energy buildings, the very small amount of energy still required for zero-emission buildings is covered by energy from on-site and nearby renewable energy sources, including from renewable energy communities and efficient district heating and cooling (in accordance with Article 26(1) of the 2023 Energy Efficiency Directive) [4].

1. EU regulations

In response to the hardships and global energy market disruption caused by Russia's invasion of Ukraine, the latest European Commission document RePower [5] provides a wide range of alternative renewable energy sources that are now available and should be an integral part of all new buildings, such as photovoltaic systems for electricity (generated on-site via PV or hybrid PV thermal on the roof or nearby) powering electric heat pumps, capturing both ambient and solar heat pumps, as well as solar thermal heat. Solar energy can provide a significant part of a building's electricity and heat demand, either through solar thermal collectors, solar PV (with heat pumps) or a combination of both, including hybrid PV-thermal technologies. Through supporting policies and regulations that ensure a level playing field for all solar technologies and do not favor one over the other, national and local authorities can promote the most efficient solution for each situation.

In all EU directives, it is committed that developing a sustainable, competitive, secure and decarbonized energy system. [6] establish ambitious Union commitments to further reduce greenhouse gas (GHG) emissions by at least 55% by 2030 compared to 1990, to increase the share of renewable energy used, to save energy in line with Union-level ambitions and to improve Europe's energy security, competitiveness and sustainability. To achieve these goals, the 2016 review of EU energy legislation combines a reassessment of the EU's 2030 energy efficiency target, a review of Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council and Directive 2010/31/EU [7].

2. Bulgarians Definition and Scope of NZEB

According to The National Nearly Zero-Energy Building Plan 2015–2020 (NPSBNPE) that was developed on the basis of Article 9(1) of Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings the legal Bulgarian definition of nZEB is:

'A nearly zero-energy building' is a building that cumulatively satisfies the following conditions:

a) the building's energy consumption, expressed as primary energy, corresponds to energy performance Class A for that type of building;

b) at least 55% of the energy used (supplied) for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting is energy from renewable sources produced in the building or in its close surroundings.

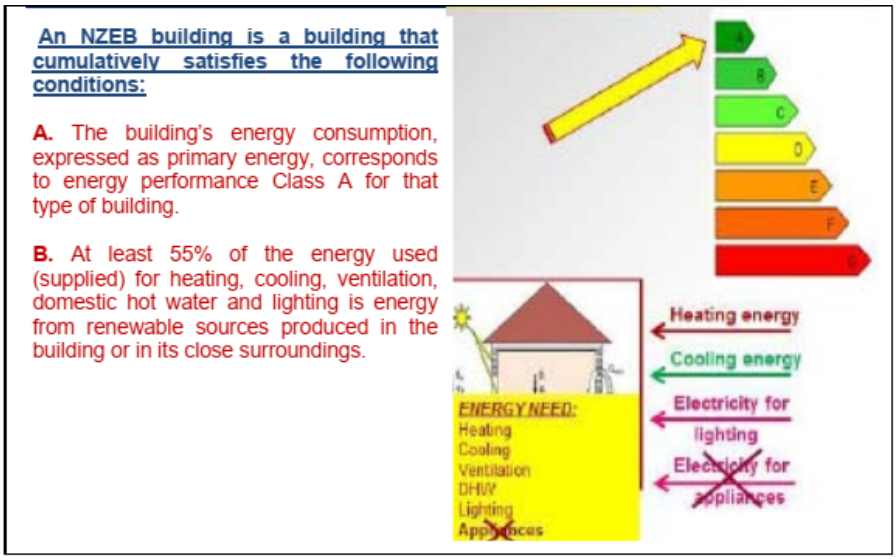


Fig.1. *nZEB definition for Bulgaria*

Key characteristics of NZEBs include:

- Very low energy demand for space heating, cooling, ventilation, hot water, and lighting.
- High-efficiency systems including HVAC, lighting, and appliances.
- On-site or nearby renewable energy generation, typically from solar PV, solar thermal, wind, biomass, or geothermal sources.
- Smart building technologies for real-time monitoring and control of energy use.
- Lifecycle assessment considerations, including embodied energy in construction materials.

3. nZEB examples from Bulgaria

3.1. Demonstrational pavilion with the innovative design built in the Scientific Campus II of the Bulgarian Academy of Science

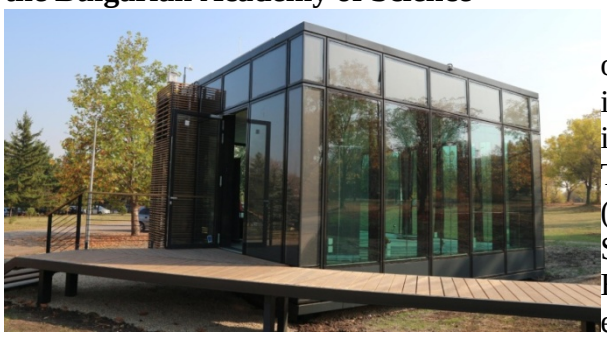


Fig. 2. *InDeWaG Demonstation Pavilion, Sofia, Bulgaia*

This InDeWaG Demonstrational Pavilion, is located on II campus of the Bulgarian Academy of Sciences in Sofia. It is a pioneering project demonstrating innovative Water Flow Glazing (WFG) technology. This demonstrator is part of the EU-funded InDeWaG (Industrial Development of Water Flow Glazing Systems) project, aiming to advance nearly Zero Energy Building (nZEB) standards through cutting-edge façade and interior systems (fig. 2). The building is oriented in clear geographic directions east-west, north-south. The pavilion is a glass-encased structure measuring 7.0 by 7.0 meters, with WFG

modules installed on the east, west, and south façades. The north façade, along with the roof and floor are well-insulated to minimize energy losses. Each WFG unit contains a circulating mixture of distilled water and glycol, which absorbs solar radiation and transports the generated heat through a pipe system. This system allows the façade to function as a heating and cooling unit, depending on the temperature of the circulating fluid. Inside, the pavilion has interior partition walls made of similar glazing elements, providing radiant heating or cooling to maintain comfortable indoor conditions [8]. The building is equipped with a monitoring system that tracks energy gains and demands, validating the performance of the WFG technology in real-time. The WFG technology significantly reduces the need for conventional HVAC systems by utilizing the thermal properties of water to regulate indoor temperatures. This approach not only enhances energy efficiency but also contributes to the building's compliance with nZEB standards as defined by Bulgarian legislation. The pavilion also incorporates rooftop photovoltaic panels and a heat pump, further supporting its sustainable energy goals .The InDeWaG project is a collaborative effort involving multiple European partners. The project's objective is to develop cost-effective, industrial-scale FFG elements that can be integrated into various building types across different climate zones. The pavilion serves as a prototype for these technologies, providing valuable data to inform future applications.

One major objective of the pavilion is to show the integration of the WFG technology into heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems in winter and summer modes. The second objective of the project is to prove that this building meets the requirements for nZEB in Bulgaria.

3.2. Family house located in Bistrica, Bulgaria with investor Lubomir Stoyanov

This family house located in the village of Bistritsa is laid out on a single storey with a total heated area of 212 m^2. Following the recommendations of the REECL team, Mr Stoyanov decided to build a nearly zero-energy building nZEB home by upgrading the building services to underfloor heating provided by highly efficient heat pump and architecturally improving the details of the building envelope. [9] This led to improving the designed energy performance rating of the building from 177 kWh/m^2 to 83 kWh/m^2 making the house meet the EU nZEB standards for Bulgaria.

Fig.3. *nZEB Family fouse - Bistrica, Bulgaia*

Mr. Stoyanov was motivated to build a nZEB house because of the wide range of benefits it offered such as: low impact from future energy price increases; better internal comfort due to more uniform interior temperatures; reduced costs of ownership due to improved energy efficiency and the materials used for building the house; reduced monthly cost of living; improved reliability – modern heat pump technologies that can last over 20 years. The extra cost of energy efficient building services is minimized for new construction compared to an afterthought retrofit and the property will have a higher resale value as potential owners will Details:

- Investments: Air to water heat pumps; underfloor heating and cooling; warm/cold air fan convectors; wireless control system; thermal insulation; doors and windows.
- Investment Size: € 42,396
- Financial results: Payback of 14 years
- Energy savings: 7,250 kWh per year
- CO_2 savings: 4,952 kg per year

- Impact: Reduced energy bills; improved living comfort; better internal air quality; improved sound insulation.

3.3. The fist mobile "Zero Energy Caravan" in Bulgaria

Fig.4*. Mobile "Zero Energy Caravan"*

The Zero Energy Caravan [10] is designed to be completely self-sufficient and not require external power sources to function. This means that the caravan uses only renewable energy sources such as solar panels, wind turbines or hydro sources to generate power for lighting, heating and cooling.

Zero-energy caravans reduce dependence on fossil fuels and carbon emissions, which is essential for protecting the environment. They can also be used in remote locations where mains electricity is not available, such as campsites, caravan parks or even as homes to live in.

The aim of the initiative is to raise public, media and professional interest in the benefits and advantages of energy efficiency. Through projects such as the Zero Energy Caravan, we strive and create the most understandable and intuitive tools possible through which people can see, touch and feel the benefits of zero energy buildings.

Conclusions

NZEBs mark a crucial evolution in building design and urban planning. By minimizing energy demand and maximizing renewable supply, they address climate, economic, and social challenges simultaneously. Although barriers remain, the trajectory of NZEBs is clear and increasingly attainable. With supportive policies, technological innovation, and market transformation, NZEBs will become the norm in both new construction and renovation across the globe.

Nearly Zero-Energy Buildings represent a vital strategy for mitigating climate change, improving energy security, and creating healthier indoor environments. Their success lies in the convergence of passive design, cutting-edge technologies, supportive policy, and behavioural change. As market maturity grows and costs continue to decline, NZEBs are poised to transition from niche innovation to standard practice.

However, to unlock the full potential of NZEBs, a coordinated effort across sectors is essential—combining public policy, private sector investment, professional education, and community engagement. The path forward requires not only technological innovation but also a rethinking of how buildings are conceived, valued, and integrated into the broader energy ecosystem.

References

[1] European Parliament and the Council, "Energy Performance of Buildings Directive — revised," 2024. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive

[2] European Commission, "The European Green Deal — Striving to be the first climate-neutral continent," 2020. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[3] T. Hesse and S. B., EU 2040 Climate Target: Contributions of the Buildings Sector, Oeko-Institut, Freiburg, 2024.

[4] European Parliament and the Council, "Directive 2012/27/EU on energy efficiency," 2012. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027

[5] European Commission, "REPowerEU — Affordable, secure and sustainable energy for Europe," 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en

[6] European Council, "2030 Climate and Energy Policy Framework," 2024. [Online]. Available: https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/en/pdf

[7] European Parliament and the Council, "Directive (EU) 2018/844 … amending Directive 2010/31/EU … and Directive 2012/27/EU," 2018. [Online]. Available: http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj

[8] K. Georgiev, N. K. Vitanov, and M. Stoyanova, "Study of Time Series Connected to an Innovative Window Heat Transfer System," in Advanced Computing in Industrial Mathematics (SCI 1076), Springer, 2023, pp. 24–33. doi:10.1007/978-3-031-20951-2_3.

[9] "A House Built to 'nZEB' Standards Sets an Example for Green Living in Bulgaria," [Online]. Available: https://ebrdgeff.com/projects/a-house-built-to-nzeb-standards-sets-an-example-for-green-living-in-bulgaria/

[10] EnEffect, "The First Zero-Energy Caravan in Bulgaria Became the Attraction of the Architecture and Construction Week," Mar. 30, 2023. [Online]. Available: https://www.eneffect.bg/bg/news/1165/the-first-zero-energy-caravan-in-bulgaria-became-the-attraction-of-the-architecture-and-construction-week

[11] "The National Nearly Zero-Energy Building Plan 2015–2020 (NPSBNPE)," [Online]. Available: https://www.seea.government.bg/documents/BG_National_nZEB_Plan_EN.pdf

[12] N. C. Aelenei, "New Challenge of the Public Buildings: nZEB Findings from IEE RePublic_ZEB Project," Energy Procedia, vol. 78, 2015, pp. 2016–2021. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.195.

БУДІВЛІ З МАЙЖЕ НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ (NZEB) – СТАЛИЙ ШЛЯХ У МАЙБУТНЄ ЗАБУДОВИ ТА БОЛГАРСЬКИЙ ДОСВІД

Красімір ГЕОРГІЄВ
Інститут механіки Болгарської академії наук
ул. акад. Г. Бончев, 4, 1113 Софія, Болгарія
https://orcid.org/0009-0002-3675-9863

Анотація

Концепція будівель із майже нульовим споживанням енергії (NZEB) є трансформаційним підходом до проєктування, зведення та експлуатації будівель, що має на меті суттєве скорочення енергоспоживання та впливу на довкілля. Оновлена Директива про енергетичну ефективність будівель (ЄС/2024/1275) вимагає, щоб усі нові будівлі відповідали вищим стандартам ефективності, ніж раніше, з урахуванням можливостей використання місцевих альтернативних джерел енергії на основі оцінки економічної доцільності та без шкоди для комфорту мешканців.

У контексті загострення глобальних проблем зміни клімату, енергетичної безпеки та виснаження ресурсів, будівельний сектор — який становить приблизно 30–40% світового енергоспоживання та пов'язаних з ним викидів парникових газів — перебуває під дедалі пильнішою увагою. NZEB-проєкти передбачають мінімізацію потреби в енергії за допомогою високоефективних систем та пасивних архітектурних рішень, а решта потреб покривається за рахунок відновлюваних джерел енергії, виробленої на місці або поблизу. У статті представлено болгарський досвід на прикладі кілткох таких будівель побудованиз за вказаною концепцією.

Ключові слова: будівлі з майже нульовим споживанням енергії (NZEB), енергоефективність, стала архітектура, відновлювана енергія, проєктування будівель, пасивний дім, розумні будівлі, нульовий енергетичний баланс, зелене будівництво.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330386

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ НАНОКАТАЛІЗАТОРІВ НА ОСНОВІ СПОЛУК МАНГАНУУ ВОДНЕВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Ольга ГЛУШКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: oolga.glushkoo@gmail.com

Анотація

Розглянуто сучасні підходи до розробки марганцевих нанокаталізаторів як перспективної альтернативи дорогим благородним металам для фотокаталітичного виробництва водню. Проаналізовано основні переваги та недоліки традиційних методів виробництва водню з викопних палив та зеленого водню, отриманого з відновлюваних джерел енергії. Детально розглянуто вплив морфології, наноструктури, питомої площі поверхні, кристалічних площин та концентрації структурних дефектів оксидів марганцю та нанокомпозитних систем MnO_2-AC, CeO_2-MnO_2 та MnO_2-g-C_3N_4 на їх каталітичну ефективність та здатність імітувати природний водо-окиснювальний комплекс фотосинтезу.

Ключові слова: *діоксид мангану, нанокаталізатори, фотокаталітична активність, воднева енергетика*

Стрімкий розвиток глобальної економіки, зростання населення та прискорення урбанізації призвели до критичного збільшення потреби в енергії. Інтенсивне використання традиційних енергетичних ресурсів, зокрема викопних палив (вугілля, нафта, природний газ), спричиняє істотне погіршення екологічної ситуації через значні викиди парникових газів, насамперед CO_2, що є основним фактором глобального потепління. Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC) встановила мету досягнення нульових викидів CO_2 до 2050 року та обмеження підвищення температури не більше ніж на 1,5°C порівняно з доіндустріальним рівнем [1].

Водень (H_2), як найпоширеніший елемент у Всесвіті, розглядається як перспективний енергоносій майбутнього, здатний зробити значний внесок у декарбонізацію енергетичного сектору. Ключовими перевагами водню є його екологічна чистота (єдиним продуктом окиснення є вода), нетоксичність та високий енергетичний потенціал [2]. Однак комплексний аналіз технологій виробництва водню свідчить про наявність певних екологічних обмежень, пов'язаних з вибором сировини та енергетичними витратами.

На сьогодні водень, виготовлений з вугілля та природного газу, генерує 2,4% глобальних викидів CO_2 (900 Мт щорічно). Потреба у водні важко піддається скороченню через його критичну роль як хімічної сировини для виробництва аміаку, метанолу та в металургійній промисловості. Добрива, вироблені з аміаку, забезпечують продовольчу безпеку половини світового населення, що підкреслює стратегічну важливість водню. Прогнозується зростання

попиту на чистий водень з 90 Мт у 2022 році до 540 Мт у світі з нульовими викидами до 2050 року [3]. Технології виробництва низьковуглецевого водню доступні, але їх висока вартість перешкоджає впровадженню. Зелений водень, отриманий електролізом на відновлюваних джерелах енергії, характеризується низькими викидами CO_2 (0,3 кг CO_2 кг$^{-1}$ H_2), проте висока вартість (2,5–6,5 дол. США кг$^{-1}$) більш ніж удвічі перевищує вартість "сірого" водню з викопного палива (1,0–2,7 дол. США кг$^{-1}$).

Серед різноманітних методів виробництва водню найперспективнішими вважаються термохімічні цикли розщеплення води (TWSC), фотобіологічний органічний фотоліз та фотоелектрохімічна (PEC) технологія. Остання відкриває нові можливості для перетворення сонячної енергії в хімічну шляхом розщеплення води. Особливо перспективним є фотокаталітичне розщеплення води з використанням нанокомпозитних фотокаталізаторів, що дозволило досягти чотирикратного збільшення продуктивності водню [4].

Фотосинтез є фундаментальним природним процесом, який слугує основою для розуміння та розробки сучасних технологій перетворення енергії. Цей складний біохімічний процес, що еволюціонував протягом мільйонів років, демонструє унікальну ефективність у перетворенні сонячної енергії в хімічну при кімнатній температурі та нормальному тиску. Центральним елементом є водо-окиснювальний комплекс (WOC), що містить каталітичний центр з унікальним кластером Mn_4CaO_5 [5]. Цей кластер забезпечує ефективне розщеплення води з утворенням кисню, електронів та протонів.

Однак сучасні синтетичні моделі, спрямовані на відтворення ефективності WOC, характеризуються критичними обмеженнями. Багатьом синтетичним каталізаторам важко досягти рівня ефективності природних систем у каталізі окислення води [5,6].

Ключовим фактором успішного розвитку водневих технологій є створення ефективних, стабільних та економічно доступних каталізаторів. Оксиди марганцю демонструють значний потенціал як альтернатива дорогим благородним металам (платина, іридій), поєднуючи високу каталітичну активність з економічною доступністю та екологічною безпечністю. Унікальність марганцевих оксидів полягає у їхній структурній різноманітності, здатності формувати різні наноструктури та шаруваті утворення, що суттєво розширює можливості оптимізації каталітичних властивостей. Особливо цікавою є їхня здатність імітувати природні процеси фотосинтезу, зокрема роботу водо-окиснювального комплексу (WOC), що відкриває перспективи для розробки біоміметичних каталізаторів [6].

Мета роботи — вивчення літературних джерел та аналіз інформації щодо впливу наноструктурування та модифікації оксидів марганцю на їх каталітичну активність у процесах розщеплення води для виробництва водню.

Ефективність марганцевих нанокаталізаторів для водневих технологій значною мірою залежить від методів їх синтезу та способів характеристики. Кожен метод має свої особливості, переваги та обмеження, які безпосередньо впливають на структуру, морфологію та каталітичні властивості отриманих матеріалів. Розуміння цих взаємозв'язків є критично важливим для розробки високоефективних каталізаторів з оптимальними характеристиками для мінімізації екологічного впливу водневих технологій.

Перспективним напрямком є застосування нанокомпозитів на основі діоксиду марганцю (MnO_2) та активованого вугілля (AC), що демонструють підвищену ефективність у фотокаталітичних процесах для виробництва водню. Розробка авторами [7] інноваційного методу синтезу нанокомпозитів MnO_2-AC з використанням біомаси листя *Azadirachta indica* як вихідного матеріалу для отримання активованого вугілля представляє значний інтерес з точки зору сталого розвитку. Процес карбонізації при 500 °C з подальшою гідролізною обробкою забезпечує формування однорідних нанопластівців AC, а оптимізоване співвідношення компонентів 1:1

при створенні композиту та застосування ультразвукової обробки покращують дисперсність частинок та їх взаємодію. BET-аналіз виявив значне збільшення питомої площі поверхні композиту (109 м²/г) порівняно з чистим MnO_2 (64 м²/г), хоча це значення менше, ніж у чистого АС (822 м²/г). Формування мезопористої структури з середнім розміром пор 7,66 нм створює оптимальні умови для фотокаталітичних реакцій виділення водню. Морфологічний аналіз FE-SEM продемонстрував формування специфічної пучкоподібної структури наночастинок MnO_2 та їх рівномірний розподіл на поверхні нанопластівців АС. Фотокаталітична активність композиту MnO_2-АС в умовах сонячного опромінення значно перевищувала показники чистого MnO_2, що підтверджує синергетичний ефект компонентів та відкриває можливості для розробки ефективних технологій виробництва водню як екологічно чистого енергоносія з використанням відновлюваних ресурсів.

Також у сучасних дослідженнях композитних матеріалів особлива увага приділяється вивченню фотокаталітичних властивостей систем на основі оксидів церію та марганцю. Так, у роботі [8] було отримано та вивчено вплив складу та структури композитів CeO_2-MnO_2 на їх фотокаталітичні характеристики. Композити були синтезовані шляхом термального розкладу прекурсорів $Ce(NO_3)_3$•$6H_2O$ та $KMnO_4$ з отриманням матеріалів з різними співвідношеннями металів (1:1, 1:2, 2:1). Дифузійна відбивна спектроскопія показала, що формування композиту призводить до зменшення ширини забороненої зони, що значно покращує здатність до поглинання видимого світла та переносу електронів. Флуоресцентна спектроскопія виявила збільшення середнього часу життя електронів при підвищенні вмісту марганцю у композиті, що свідчить про зростання електронної щільності та покращення переносу фотогенерованих електронів. Фотокаталітичні експерименти з сонячним симулятором продемонстрували, що композит з співвідношенням 1:1 генерував 90,3 μmol H_2 за годину, а з додаванням протонного джерела (діетиламін гідрохлорид) цей показник зріс до 103,5 μmol H_2. Найвищу активність показав композит із співвідношенням компонентів 1:2, генеруючи 540 μmol H_2 на годину під видимим світлом. Електрохімічна імпедансна спектроскопія в середовищі 1 M NaOH підтвердила ефективність переносу зарядів у композитних системах, що є критично важливим для фотокаталітичного розщеплення води.

Передовий підхід до створення ефективних марганцевих нанокаталізаторів представлений у дослідженні композитів MnO_2-g-C_3N_4 з контрольованими кристалічними площинами [9]. Автори зосередили увагу на вивченні впливу різних експонованих кристалічних площин діоксиду марганцю — (111), (002) та (110) при їх нанесенні на графітовий нітрид вуглецю на процес фотокаталітичного виділення водню під дією видимого світла. Синтез композитів передбачав цілеспрямоване формування специфічних кристалічних поверхонь MnO_2 з наступним поєднанням з g-C_3N_4, що дозволило створити матеріали з унікальними поверхневими характеристиками. Кристалічна площина (111) MnO_2 характеризується найвищою концентрацією кисневих вакансій та оптимальними властивостями поглинання видимого світла. Ці особливості забезпечують значно вищу фотокаталітичну активність порівняно з площинами (002) та (110). Дослідження продемонструвало, що дана кристалічна поверхня забезпечує найефективніший перенос електронів та розділення зарядів за Z-механізмом, що суттєво покращує процес виділення водню. Основні відмінності у каталітичній активності різних композитів обумовлені специфічними атомними конфігураціями та електронними структурами кристалічних площин, які визначають щільність кисневих дефектів, спектральні властивості та характеристики переносу носіїв заряду. Площина (111) відзначається підвищеною щільністю кисневих вакансій та сприятливими електронними параметрами для ефективного розділення фотогенерованих зарядів, що робить її найперспективнішою для фотокаталітичних застосувань. Площини

(002) та (110) мають відмінні поверхневі енергії та концентрації структурних дефектів, що призводить до порівняно нижчої каталітичної ефективності.

Такі структурні особливості відіграють визначальну роль, оскільки конкретні кристалічні площини можуть як стимулювати, так і обмежувати перенос фотоіндукованих електронів та дірок, що безпосередньо впливає на загальну ефективність процесу виділення водню. Автори [9] відмічають, що управління експонованими кристалічними площинами MnO_2 є потужним засобом для кардинального підвищення фотокаталітичної активності композитних систем на основі g-C_3N_4, що створює нові перспективи для розробки високопродуктивних фотокаталізаторів для сталого виробництва водню з води.

Висновки

Проведений аналіз літератури дозволяє стверджувати наступне:

1. Використання екологічно чистих відновлювальних джерел енергії є актуальним питанням і головним завданням сьогодення. Пріоритетним напрямком з точки зору сталого розвитку та декарбонізації енергетичного сектору є розробка та впровадження зелених технологій синтезу водню. Особливо перспективним є фотокаталітичне розщеплення води з використанням нанокомпозитних фотокаталізаторів, що дозволяє значно збільшити продуктивність отримання водню.

2. Оксиди марганцю та нанокомпозитні матеріали на їх основі демонструють значний потенціал як економічно доступна альтернатива дорогим благородним металам, поєднуючи високу каталітичну активність з екологічною безпечністю. Їх здатність імітувати природні процеси фотосинтезу через відтворення роботи водо-окиснювального комплексу відкриває нові перспективи для біоміметичних каталізаторів.

3. З опублікованих наукових досліджень виходить, що ключовими параметрами, що визначають каталітичну активність фотокаталізаторів, є морфологія та наноструктура матеріалів, питома площа поверхні та пористість, кристалічна структура та експоновані площини, концентрація структурних дефектів та кисневих вакансій, а також ефективність переносу фотогенерованих зарядів. Так, літературні дані свідчать, що композити на основі діоксиду марганцю та активованого вугілля характеризуються збільшенням питомої площі поверхні та підвищеною фотокаталітичною активністю завдяки синергетичному ефекту компонентів, системи з оксидом церію здатні генерувати значну кількість водню під видимим світлом при оптимальному співвідношенні компонентів, а композити з графітовим нітридом вуглецю з контрольованими кристалічними площинами мають найвищу ефективність завдяки оптимальній концентрації кисневих вакансій.

З огляду на вище сказане, перспективним напрямком у створенні ефективних, економічно доступних та екологічно безпечних технологій виробництва водню є розробка та синтез нанокаталізаторів на основі сполук мангану.

Література

1. Tollefson J. IPCC says limiting global warming to 1.5 °C will require drastic action. *Nature.* 2018. Vol. 562, no. 7726. P. 172–173. URL: https://doi.org/10.1038/d41586-018-06876-2

2. Titus E. Clean hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, no. 22. P. 12067. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.003

3. Natural hydrogen resource accumulation in the continental crust / C. J. Ballentine et al. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2025. Vol. 6, no. 5. P. 342–356. URL: https://doi.org/10.1038/s43017-025-00670-1

4. A Comprehensive Study on Methods and Materials for Photocatalytic Water Splitting and Hydrogen Production as a Renewable Energy Resource / M. Rafique et al. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2020. Vol. 30, no. 10. P. 3837–3861. URL: https://doi.org/10.1007/s10904-020-01611-9

5. Barber J., Tran P. D. From natural to artificial photosynthesis. *Journal of The Royal Society Interface*. 2013. Vol. 10, no. 81. P. 20120984. URL: https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0984

6. Water oxidation on a mononuclear manganese heterogeneous catalyst / J. Guan et al. *Nature Catalysis*. 2018. Vol. 1, no. 11. P. 870–877. URL: https://doi.org/10.1038/s41929-018-0158-6

7. Upcycling of Wastewater via Effective Photocatalytic Hydrogen Production Using MnO_2 Nanoparticles–Decorated Activated Carbon Nanoflakes / S. Sekar та ін. Nanomaterials. 2020. Т. 10, № 8. С. 1610. URL: https://doi.org/10.3390/nano10081610

8. Boosting charge separation of CeO_2–MnO_2 nanoflake with heterojunctions for enhanced photocatalytic hydrogen generation / M. A. Sha та ін. Materials Chemistry and Physics. 2023. Т. 294. С. 127019. URL: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127019

9. Manganese dioxides with different exposed crystal plane supported on g-C_3N_4 for photocatalytic H_2 evolution from water splitting / X. Liu et al. International Journal of Hydrogen Energy. 2022. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.174

PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF MANGANESE COMPOUND-BASED NANOCATALYSTS IN HYDROGEN ENERGY

Olha HLUSHKO
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteysky Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0006-9500-7046

Abstract

This paper reviews modern approaches to developing manganese nanocatalysts as a promising alternative to expensive noble metals for photocatalytic hydrogen production. The main advantages and disadvantages of traditional hydrogen production methods from fossil fuels and green hydrogen from renewable energy sources are analyzed. The influence of morphology, nanostructure, specific surface area, crystal planes, and concentration of structural defects of manganese oxides and nanocomposite systems MnO_2-AC, CeO_2-MnO_2, and MnO_2-g-C_3N_4 on their catalytic efficiency and ability to mimic the natural water-oxidation complex of photosynthesis is investigated in detail.

Keywords: manganese dioxide, nanocatalysts, photocatalytic activity, hydrogen energy.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330194

PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF NOVEL DESIGN OF THE SPACER FOR THE MEMBRANE MODULE

Serhii HULIIENKO[1], Vitalii YASENCHUK[1], Kostiantyn GATILOV[2]
[1]*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteiskyi Ave., 03056 Kyiv, Ukraine*
[2]*Cargill Bioidnustrial B.V.*
Buurtje 1, 2802BE Gouda, Netherlands
e-mail: sergiiguliienko@gmail.com

Abstract

In the current work, the results of the assessment of the effectiveness of the novel design of the spacer for the spiral wound membrane module using computational fluid dynamics methods were represented. The feature of the new design of the spacer is the shape of the filament, which has a triangle shape of cross-section. The results of the simulation have demonstrated that this shape of filament allowed for decrease the number of the stagnant zones in comparison with the conventional spacer design (filament with round cross-section). Also, in the considered range of conditions, a decrease of the pressure drop by 12-18% is observed in the channels with the novel design of spacer.

Key words: *membrane, module, spacer, simulation, computational fluid dynamics, pressure drop.*

Introduction

The pressure driven membrane processes are widely used in the purification of industrial wastewaters [1]. The suitable design of the membrane module is an important factor for the effective membrane performance. In particular, in the spiral wound membrane modules, which are the most widely used design, the spacer is the key element [2]. For the increase of the effectivity of the performance of such modules, a significant number of novel spacer designs were proposed [3-5]. The simulations using the computational fluid dynamics methods demonstrated the high effectiveness of such design, however, there are some doubts about the possibility of manufacturing some complex designs, in particular, the ones proposed in work [5]. Therefore, of novel designs of spacers, which would be able to increase the effectiveness of the membrane module and would be suitable for the manufacturing in large scale, is still relevant. The working hypothesis is that the spacer with a triangle cross-section of the filament allows a decrease in the number of stagnant zones, which in turn allow to decrease the risk of fouling.

Purpose of work

The purpose of the work is to test the effectiveness of the spacer with the triangle-shaped filament, in particular in comparison with the conventional spacer design.

Research methodology

The research is carried out using computational fluid dynamics methods, and the simulations were realized on the program package OpenFOAM-v2212, which was applied in the previous investigation [6]. The geometry of the system under investigation was created in the program FreeCAD 1.0.0, and the visualizations of the results were realized with the aid of the program package ParaView 5.10.1.

Results and discussion

The set of simulations of the flow in the channels with the novel spacer design and the conventional spacer design with round filament was carried out for testing the effectiveness of the first one. The simulations were realized under the conditions of a constant volumetric flow rate on the inlet surface, the conditions of the static pressure on the outlet surface, the wall (non-slip) conditions on the side surface, and the spacer filaments. The simulations were carried out in the range of the volumetric flow rate 0.2-1.0 l/h, which corresponds to the experimental data obtained in work [7-8] (with recalculation relative to the cross-section area).

The visualization of the flow in the channels with the spacers is represented in Figure 1. From this figure is clearly seen that the regions with the low velocity (which is denoted by the blue color) in the channel with the triangle spacer are significantly lower, at least in zones before filaments. These results prove the working hypothesis.

Figure 2 demonstrates the dependence of the pressure drop expressed in the form of the kinematic pressure (pressure to the density ratio) from the volumetric flow rate for both channels under investigation.

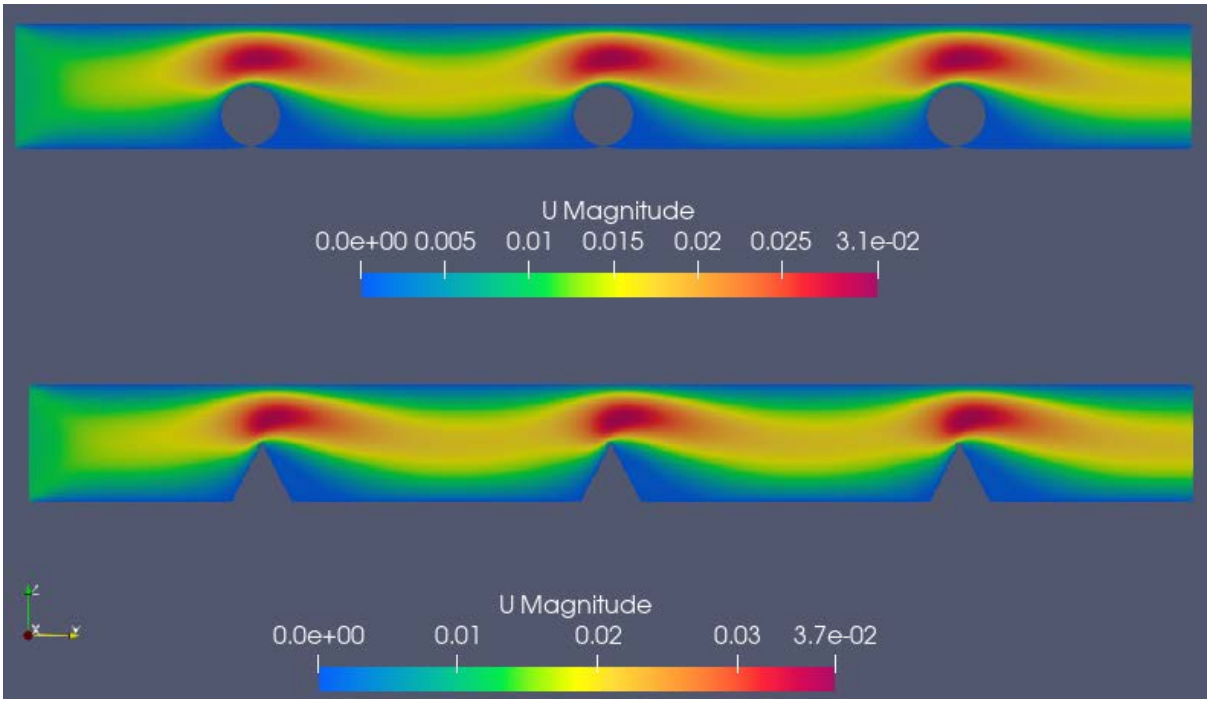


Fig. 1. *The visualizations of the in the channel with the spacers of the round and triangle shape*

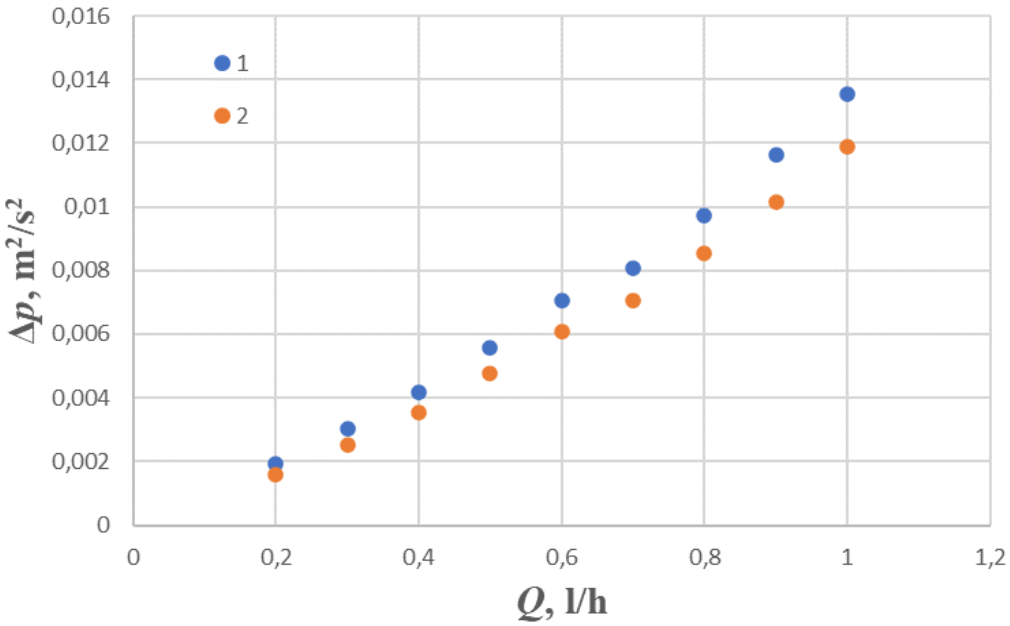


Fig. 2. *The relationship of the pressure drop (kinematic pressure) from the volumetric flow rate for the channels with the spacer round (1) and triangle (2) shapes*

The obtained results show that the pressure drop in the channels increases with volumetric flow rate, with a slight deviation from linearity. The approximation of data showed that for both shapes of the spacer, the pressure drop is proportional to the flow rate raised to the power 1.2, which indicates the presence of a slight level of turbulence. At the same time, the pressure drop in the channels with the spacer with the triangle filaments is lower in comparison with the conventional design by 12-18%/ Taking into account conclusions made in work [6], this decrease of the pressure drop can be considered as significant. The visualization of the flow (Figure 1) allows to make conclusion that new design of spacer decrease the length of the narrow sites in the channel, thereby the length of the sites with the maximal velocity is decreased (in the Figure 1 this is appears in a form of decreasing length of the red colored sites).

Conclusions

The obtained results of the simulations showed that the proposed design of the spacer allows for increasing the effectiveness of the membrane module performance via decreasing the number of stagnant zones, and also allows for decreasing the pressure drop in the membrane module channel.

References

1. Al-Obaidi, M., Kara-Zaïtri, C., & Mujtaba, I. (2017). Removal of phenol from wastewater using spiral-wound reverse osmosis process: Model development based on experiment and simulation. *Journal of Water Process Engineering*, *18*, 20–28. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.05.005

2. Srivathsan, G., Sparrow, E. M., & Gorman, J. M. (2014). Reverse osmosis issues relating to pressure drop, mass transfer, turbulence, and unsteadiness. *Desalination*, *341*, 83–86. https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.021

3. Luo, J., Li, M., & Heng, Y. (2020). A hybrid modeling approach for optimal design of non-woven membrane channels in brackish water reverse osmosis process with high-throughput computation. Desalination, 489, 114463. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114463

4. Li, M., Bui, T., & Chao, S. (2016). Three-dimensional CFD analysis of hydrodynamics and concentration polarization in an industrial RO feed channel. *Desalination, 397*, 194–204. https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.005

5. Kerdi, S., Qamar, A., Alpatova, A., Vrouwenvelder, J. S., & Ghaffour, N. (2020). Membrane filtration performance enhancement and biofouling mitigation using symmetric spacers with helical filaments. *Desalination*, *484*, 114454. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114454

6. Huliienko, S. V., Yasenchuk, V. V., & Protsiuk, M. O. (2025). Refined assessment of the impact of membrane module channel curvature on pressure drop. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, *29*(1), 55–72. https://doi.org/10.11113/jamst.v29n1.310

7. Huliienko, S., & Leshchenko, O. (2019). Influence of operating pressure on concentration polarization layer resistance in revers osmosis. *Ukrainian Food Journal, 8*(1), 119–132. https://doi.org/10.24263/2304-974x-2019-8-1-13

8. Huliienko, S. V. (2019). The Estimation of Feed Solution Composition Influence on Concentration Polarization Layer Resistance during Reverse Osmosis. *Journal of Engineering Sciences, 6*(2), f24–f29. https://doi.org/10.21272/jes.2019.6

ПОПЕРЕДНЯ ОЦІНКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СПЕЙСЕРА МЕМБРАННОГО МОДУЛЯ

Сергій ГУЛІЄНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський 37, 03056, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9042-870X

Віталій ЯСЕНЬЧУК
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський 37, 03056, Київ, Україна
https://orcid.org/0009-0006-1012-9475

Костянтин ГАТІЛОВ
Каргілл Біоіндастріал Бі Ві
Buurtje 1, 2802BE Gouda, Netherlands

Анотація

В роботі представлені оцінки ефективності нової конструкції спейсера для спіральних мембранних модулів зв використанням моделювання методами обчислювальної гідродинаміки. Особливістю нової конструкції є форма ниток, які в поперечному перерізі мають трикутну форму. Результати моделювання показують, що така форма конструкції дозволяє знизити кількість застійних зон в області перед ниткою спесера, порівняно з традиційною конструкцією спейсера (нитки з круглим поперечним перерізом). Також, в розглядуваному діапазоні умов моделювання спостерігається зменшення гідравлічного опору в каналі з новою конструкцією спейсера на 12-18%.

Ключові слова: мембрана, модуль, спейсер, моделювання, обчислювальна гідродинаміка, гідравлічний опір.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329963

CHEMICAL AND PHYSICOCHEMICAL METHODS FOR MEASURING CORROSION RATE

Oleksii HUMENIUK
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: alexei.humeniuk@gmail.com

Abstract

Metal corrosion is a complex physico-chemical process that causes significant economic losses across various industrial sectors. Ensuring environmental safety of industrial facilities by monitoring corrosion parameters is an important task. Analyses of the processes involved in corrosion are covered by materials science, chemistry, physics, engineering, and several other disciplines. It becomes very important to accurately measure rates of corrosion for service life prediction of materials as well as for the application of appropriate protection methods. This paper exposes the principal techniques for measuring corrosion rates, namely the gravimetric or weight-loss technique and the polarization resistance technique. The gravimetric technique is easy to apply but comes about with many limitations: Localized processes cannot be taken into account; accuracy is not possible; and what duration has to be applied depends is made known. The polarization resistance technique permits continuous real-time monitoring of instantaneous corrosion rate value electrochemical reactions at a metal-electrolyte interface. Among its advantages are highly sensitivity, possibility of automation, and early problem detection.

This study presents a comparative analysis of these methods, justifying the feasibility of applying the polarization approach in conditions where accuracy, speed, and data reliability are critical and highlights the importance of selecting the optimal method, considering the specifics of the environment and the accuracy requirements of corrosion measurements.

Keywords: *corrosion, gravimetric method, polarization resistance method (LPR), corrosion rate, localized corrosion, electrochemical analysis, corrosion monitoring, signal instability, long-term measurements, electrode passivation, environmental safety and monitoring.*

Relevance of the Topic

Metal corrosion is a serious issue across various industries and fields, as it leads to significant economic losses. An important task is the accurate measurement of corrosion rate, which allows for predicting the service life of materials and developing effective protection methods.

Research Objective

The study aims to analyze the main methods for measuring corrosion rate, particularly the gravimetric (weight-loss) method and the polarization resistance method.

Scientific Novelty

A comparative analysis of the main methods for measuring corrosion rate has been conducted. The advantages of the polarization resistance method over traditional techniques have been identified.

Research results

Corrosion is a natural process in which materials (mainly metals) gradually degrade due to chemical and electrochemical reactions with their environment, leading to the loss of their useful properties, such as strength. Corrosion processes are complex in nature, making their study an interdisciplinary research field that combines fundamental sciences and engineering [4]. Table 1 presents the main methods for measuring corrosion rate.

Table 1. Main Methods for Measuring Corrosion Rate

Category	Subcategory	Method Description
Under defined environmental conditions	Natural	Natural conditions
	Gravimetric (Massometry method)	Measurement of mass change
Accelerated	Natural	Natural conditions
	Gravimetric (Massometry method)	Measurement of mass change
	Assessment of environmental corrosiveness	Evaluation of corrosiveness of the environment
	Polarization resistance method	Measurement of polarization resistance
	Cyclic voltammetry	Cyclic voltammetry technique
	Impedance spectroscopy	Impedance spectroscopy technique
	Chronopotentiometry	Chronopotentiometry technique

The gravimetric method is one of the most common techniques for quantifying corrosion rates (CRs), as it is simple to use and does not require measuring currents or voltages.

There are national and international regulations governing the handling of hazardous chemicals, based on the "United Nations Recommendations on the Transport of Dangerous Goods" and the "Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals (GHS)". According to the "Manual of Test and Criteria" [6], a substance is considered corrosive if its corrosion rate (CR), measured using the immersion test for at least 168 hours (1 week), exceeds 6.25 mm per year at a test temperature of 55°C on steel or aluminum surfaces.

To quantify corrosion rates (CRs) using the weight-loss method (immersion test), the mass loss of the specimen (with a known surface area) is determined by measuring the difference in weight before and after immersion in a corrosive medium for a specified period [4].

This method is simple and well-established, but it has several limitations: it only provides the average corrosion rate over the immersion test duration, without capturing variations in oxidation kinetics; potential inaccuracies in CR determination due to incomplete or excessive removal of corrosion products after immersion; it does not provide insights into corrosion mechanisms; it may underestimate the actual corrosion rate if localized corrosion is the dominant mechanism.

Industry standards such as ISO, ASTM, and NACE TM0169/G31−12a (are widely used in industrial and academic research. They outline methodologies for quantifying corrosion rates using immersion test experiments. The formula commonly used in academic literature for calculating CR is as follows:

$$CR = \frac{k \cdot mloss}{A \cdot \rho \cdot t} \quad (1),$$

where:

- k – constant (8.76×10^4) to express CR in, mm/year,
- m_{loss} – mass loss of the metal, g ($m_0 - m_f$),
- t – exposure time, hours,
- A – surface area of the material, cm^2,
- ρ – density of the material, g/cm^3 [4].

Since corrosion rate quantification via immersion tests relies on mass change measurements, it is crucial to ensure a significant (measurable) mass change to minimize weighing errors, which is typically achieved over long exposure times. But it might cause surface area change when kept for a long time. The ASTM standard says that slow tests are more true than quick ones. Also, corrosion should not get so bad that the starting size of the piece or the area it shows is much smaller, or until the metal has a hole in it.

Linear Polarization Resistance (LPR) is the real-time corrosion monitoring/ measuring technique by which polarization resistance helps to detect corrosion problem at an early stage enabling preventive action thereby prolonging the life of the equipment and reducing unplanned downtime. The equipment life and unplanned downtime can be prolonged and reduced respectively as long as continuous monitoring is done based on this technique. For more than thirty years, LPR has been applied successfully in virtually all water-based corrosive environments such as: cooling water systems; secondary recovery systems; potable water treatment and distribution; amine sweetening; wastewater treatment; pickling and extraction of minerals; hydrocarbon production when free water is present with no problems. When a metal/alloy electrode is immersed in an electrolytic liquid with sufficient oxidizing power, corrosion occurs through an electrochemical mechanism involving two simultaneous reactions: at anodic sites, metal dissolves into the solution, leaving excess electrons at the metal surface; at cathodic sites, these electrons are consumed by oxidizing species from the corrosive liquid [3].

The corrosion current (Icorr), generated by the electron flow between anodic and cathodic sites, can be used to calculate the corrosion rate using a modified version of Faraday's Law:

$$C = E \cdot \frac{E \cdot Icorr}{A \cdot d} \quad (2),$$

where:

C – Corrosion rate (mils per year, MPY)
E – Equivalent weight of the corroding metal, g
A – Surface area of the corroding electrode, cm^2
d – Density of the corroding metal, g/cm^3 [3].

However, since anodic and cathodic sites constantly shift, direct measurement of Icorr is impossible. Instead, small externally applied potential shifts (E) generate a measurable current flow (I) at the corroding electrode. The relationship between I and E follows the Stern-Geary equation:

$$Icorr = I/E \times constant \quad (3).$$

The ratio E/I is known as Polarization Resistance (R_P), which is directly proportional to the corrosion rate.

To measure polarization resistance, a second electrode (auxiliary electrode) is placed in the liquid and connected to the corroding electrode (test electrode) through an external power supply.

However, in a simple two-electrode setup, the applied potential must overcome both solution resistance (Rs) and polarization resistance (Rp), leading to overestimation of Rp and underestimation of the corrosion rate:

$$Cm = Ca \times \frac{Rp}{Rp+Rs} \quad (4),$$

where:

Cm – Measured corrosion rate,0000000000

Ca – True corrosion rate [3].

In Table 2, we compare these methods for measuring corrosion rates.

Table 2. Comparison of Gravimetric and Polarization Resistance Methods for Corrosion Rate Measurement [2; 5; 1; 3; 4]

Criteria	**Gravimetric Method (Weight-Loss Method)**	**Polarization Resistance Method (LPR)**
Principle	Measures mass loss of a metal specimen after immersion in a corrosive medium.	Measures electrochemical response of a metal electrode in an electrolytic solution.
Measurement Type	Provides an average corrosion rate over a fixed period.	Allows real-time corrosion monitoring.
Time Required	Long exposure times (typically 168 hours or more) to obtain measurable mass loss.	Provides instantaneous results.
Accuracy	Can be affected by incomplete or excessive removal of corrosion products.	High sensitivity, detects minor changes in corrosion activity.
Ability to Monitor Localized Corrosion	May underestimate corrosion rate if localized corrosion dominates.	Can detect localized corrosion effects.
Destructiveness	Destructive – requires removal and weighing of the specimen.	Non-destructive – does not require sample removal.
Application Areas	Used in standardized immersion tests for regulatory compliance.	Used in continuous monitoring systems in industrial applications.
Industry Standards	ISO, ASTM, NACE TM0169/G31−12a.	Commonly used in water treatment, cooling systems, hydrocarbon production.
Limitations	Does not provide insights into corrosion mechanisms. Surface area changes over time, affecting accuracy.	Requires electrolytic conductivity in the medium. Can be affected by solution resistance errors.
Advantages	Simple and well-established. Does not require measuring currents or voltages.	Real-time monitoring. High sensitivity to corrosion changes. Continuous monitoring capability.

Recommendations for further applied research

Since the gravimetric method gives an average corrosion rate but LPR gives instantaneous values, a study of the effectiveness of a combined approach to data reliability is thereby suggested. This has to be done in localized corrosion since the gravimetric method tends to underestimate its effects. Long-term measurements for LPR, being real-time results, thus have to be investigated for signal stability and the possible effects of noise or electrode passivation in longer periods.

References

1. Brown, R. H., English, G. C., & Williams, R. D. (1950). The role of polarization in electrochemical corrosion. CORROSION, 6(6), 186–195. https://doi.org/10.5006/0010-9312-6.6.186
2. Kuratani, K., Fukami, K., Tsuchiya, H., Usui, H., Chiku, M., & Yamazaki, S. (2022b). Electrochemical Polarization Part 1: Fundamentals and Corrosion. Electrochemistry, 90(10), 102003. https://doi.org/10.5796/electrochemistry.22-66085
3. Linear Polarization Resistance (LPR). Alspi. Monitoring. URL: https://www.alspi.com/lprintro.htm
4. Malaret F. (2022) Exact calculation of corrosion rates by the weight-loss method. Experimental Results. 2022;3:e13. doi:10.1017/exp.2022.5. URL: https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-results/article/exact-calculation-of-corrosion-rates-by-the-weightloss-method/B599C69ADCC00D7749A826E750F70ACB
5. Papavinasam, S. (2021). Electrochemical polarization techniques for corrosion monitoring. In Elsevier eBooks (pp. 45–77). https://doi.org/10.1016/b978-0-08-103003-5.00003-5
6. UN ECE . (2019). Manual of tests and criteria (7th ed., p. 536). United Nations URL: https://digitallibrary.un.org/record/3846833/files/Manual_Rev7_E.pdf

ХІМІЧНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ

Олексій ГУМЕНЮК
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0001-8655-1334

Анотація

Корозія металів є складним фізико-хімічним процесом, що спричиняє серйозні економічні втрати в різних галузях промисловості. Забезпечення екологічної безпеки експлуатації промислових об`єктів шляхом моніторингу параметрів корозії є важливим завданням. Вивчення процесів корозії є міждисциплінарним напрямом, що охоплює матеріалознавство, хімію, фізику та інженерію. Актуальним завданням є точне вимірювання швидкості корозії для прогнозування терміну служби матеріалів та впровадження ефективних методів захисту. У дослідженні надана характеристика основних методів вимірювання швидкості корозії, зокрема гравіметричного (методу втрати маси) та методу поляризаційного опору. Гравіметричний метод є простим у реалізації, однак має ряд недоліків: обмеження в точності, неможливість врахування локальних процесів, залежність від тривалості експозиції. Метод поляризаційного опору дозволяє здійснювати безперервний моніторинг у реальному часі, визначаючи миттєві значення швидкості корозії. Він базується на електрохімічних реакціях на межі метал-електроліт, де через малі зовнішні потенціали вимірюється корозійний струм. Перевагами є висока чутливість, можливість автоматизації та раннє виявлення проблем. У роботі проведено порівняльний аналіз зазначених методів, що дозволяє обґрунтувати доцільність застосування поляризаційного підходу в умовах, де необхідна точність, швидкість та надійність даних. Дослідження підкреслює важливість вибору оптимального методу з урахуванням специфіки середовища та вимог до точності вимірювань.

Ключові слова: корозія, гравіметричний метод, метод поляризаційного опору, швидкість корозії, локалізована корозія, електрохімічний аналіз, моніторинг корозії, нестабільність сигналу, довготривалі вимірювання, пасивація електродів, екологічна безпека та моніторинг.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331043

SENSITIVITY OF URBAN LANDSCAPE GREENNESS TO SPATIAL RESOLUTION OF THE POPULAR REMOTE SENSING PRODUCTS

Iryna DRONOVA
University of California Berkeley
130 Mulford Hall #3114, Berkeley, CA 94720-3114, USA
e-mail: idronova@berkeley.edu

Abstract

Rapid expansion of remote sensing applications in urban landscapes has increased the opportunities for cost-effective inference of vegetation cover proxies using spectral indices of greenness. However, as these studies and data synthesis efforts advance, an important question arises about the statistical comparability and robustness of greenness indicators across different remote sensing sources. This study tested whether and to what extent the statistical distribution of a popular spectral greenness indicator (Normalized Difference Vegetation Index, or NDVI) changes among popular image products when the latter are acquired over the same study area very closely in time. Using the city of Sacramento, California, USA as a test case study, NDVI metrics were extracted from four remote sensing products at 1m, 10m, 30m, and 500m spatial resolution at nearly the same observation time in June 2022. Comparison of statistical distributions of NDVI indicated that central values tend to progressively increase with coarser pixel sizes, making the city appear on average "greener" at moderate to coarser resolutions than at higher resolutions. In contrast, metrics of dispersion such as standard deviation, and the occurrence of extreme high and low index values decreased with coarser spatial resolution. Aggregation of high-resolution products to coarser pixel scales of other products did not produce equivalent statistical distributions. Together, results indicate that the magnitude and variation of remote sensing-derived greenness indicators in cities must be interpreted relative to both the source sensor product and its spatial resolution. Future work should investigate this scale sensitivity more in-depth expanding to a larger sample of cities in different bioclimatic regions and develop generalizable guidance on navigating across different scales of widely used remote sensing datasets.

Key words: *remote sensing; urban landscapes; spectral greenness; spectral vegetation indices; spatial resolution.*

Remote sensing-based indicators of vegetation greenness have gained huge popularity in urban studies. With the growing availability of open-access satellite image datasets and efficient computational tools, such indices can be now computed from a wide variety of products in different geographic contexts. Not surprisingly, their applications have expanded from basic mapping and inventory to the assessments of urban vegetation effects on human health (e.g., [1– 3]), important ecological functions [4–6], urban planning and socio-economic issues [7,8], and even extensive

synthetic reviews and meta-analyses which pool the data from diverse sources (e.g., [2,3]). These efforts raise an important question of the statistical comparability and robustness of greenness indicators across different remote sensing sources.

Despite the increasing accessibility of data, this question remains somewhat under-investigated. In part this is because popular indicators of greenness are often computed as "normalized difference" indices where the difference between two relevant electromagnetic signals is divided by their sum [9]. This produces a unitless outcome constrained to the [-1; 1] range which can be compared more easily between locations and time frames than the original absolute image brightness or reflectance. However, it is not well understood to what extent such normalized greenness varies with image spatial resolution (aka image grain size, the ground dimension of the smallest resolvable pixel). Historically, most readily available products have had moderate to coarse pixel sizes (often 30-1000 m) which in patchy urban landscapes would be frequently "mixed", containing both vegetated and not vegetated surfaces [9]. More recently, higher- resolution commercial and open-access imaging products have started to enhance urban green space monitoring and mapping accuracy [9]; however, due to their limited historical availability, long-term change analyses still tend to rely on the coarser datasets [6]. Yet, explicit multi-sensor comparisons among these versatile data sources are relatively few [5,10,11].

Data timing is an important challenge for such comparisons. To robustly measure the sensitivity of greenness to image product scale, observations from different instruments should be ideally taken as close in time as possible. Otherwise, their differences may be confounded by seasonal phenological shifts in vegetation or by other landscape changes between the acquisition dates. In practice, however, gaps and misalignment in satellite revisit times as well as cloud cover interference can limit the availability of data for such investigations.

To address this challenge and research need, this study tested whether and to what extent the statistical distribution of a popular spectral vegetation index changes among popular image products when the latter are acquired over the same study area very closely in time. It was hypothesized that changes in spatial resolution would most strongly affect extreme values of the statistical distribution (e.g., minimum and maximum) and dispersion measures (i.e., standard deviation), because smaller pixels are more likely to encounter 100% coverage of very green landscape covers (e.g., urban forest canopy). It was also expected that aggregating high- resolution imagery of a given sensor to coarser resolutions of temporally matching products of other sensors should produce very similar statistical distributions due to high similarity of the state of the landscape and the same seasonality conditions.

To test these predictions, the study focused on the city of Sacramento, California, USA, for which several imaging products were acquired in very close temporal proximity in June 2022 (Table 1). Three of these products are satellite datasets available in open research access as fully atmospherically corrected surface reflectance products: MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra with 500 m pixel size, Landsat-9 with 30 m pixel size, Sentinel-2 with 10 m pixel size of the relevant electromagnetic bands. The fourth product was an orthorectified aerial image from the USA-specific publicly accessible product. The latter product was available from the U.S. Department of Agriculture's National Agriculture Imagery Program (NAIP) which collects high resolution (0.6-1 m) imagery once per 2-3 years in each U.S. mainland state during the summer growing season time frame.

Urban vegetation greenness was represented using a popular Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), computed as the normalized difference between near-infrared and red electromagnetic wavebands available in all four imaging sensors. Each remote sensing product on its respective day (Table 1) was clipped to the urban boundary of the study area and converted to a single raster NDVI image. Statistical distributions and descriptive summary statistic metrics were then computed for each clipped NDVI image and compared among four products. To further test whether the observed differences were only due to varying pixel size, images of the two finest-grain products (NAIP and

Sentinel-2) were separately aggregated to spatial resolutions of other coarser products (Table 1). Then, relative histogram frequencies and summary statistics of the aggregated images were compared to those of the sensor products at their native spatial resolutions (e.g., NAIP aggregated to 10 m was compared with Sentinel-2 at its native 10 m resolution, NAIP aggregated to 30 m was compared with Landsat at 30m, and so on).

Table 1. Remote sensing datasets used in this study

Sensor	Product	Pixel size, meters	Image date	Red band (micrometres)	Near-infrared band (micrometres)
MODIS Terra	Surface reflectance	500	June 21, 2022	0.62-0.67	0.841-0.876
Landsat-9	Surface reflectance	30	June 20, 2022	0.64-0.67	0.85-0.88
Sentinel-2	Surface reflectance	10	June 21, 2022	0.64-0.68	0.77-0.88
NAIP	Brightness (DN)	1	June 21, 2022	~0.60-0.70	~0.77-0.99

Statistical distributions of NDVI showed pronounced differences between the four image products, despite the similar timing of their acquisitions. Central values (mean and median) of the distributions showed a tendency to increase with greater (coarser-resolution) pixel size (Figure 1, Table 2). Given that the minimum threshold of NDVI for green vegetation is often around 0.3, mean NDVI for Landsat and MODIS were closer to this threshold than the other two products. These results disagree with the expectation that central values of the NDVI distributions should stay similar among different products and instead suggest that the city is more likely to appear on average "greener" when using a coarser-resolution image product than with a higher-resolution product taken on the same date.

In contrast, standard deviation of NDVI generally decreased with greater pixel size from NAIP to MODIS, despite the simultaneous decrease in the total number of pixels, though it was relatively similar between Landsat and Sentinel-2 (Table 2). The coarsest-grain MODIS data also had the highest minimum and the lowest maximum NDVI values compared to the other three sensors (Table 2). These results agree with the expectation that smaller pixels are more likely to capture cases of extreme positive values such as high-NDVI pixels with 100% green tree or grass cover. Notably, MODIS was the only product here with a positive minimum NDVI value (Table 2).

While more common in water bodies, negative values of NDVI in urban contexts may also occur in pixels with 100% cover of dark urban shadows. At the high solar elevation midday time frames of sun-synchronous satellite observations (e.g., Landsat) such shadows are likely to be relatively narrow, and thus not as likely to produce low negative values in larger pixels.

The statistics of NAIP and Sentinel-2 images aggregated to coarser spatial resolutions in most cases differed from the statistics of the respective datasets at those native resolutions (examples for three statistical metrics are shown in Figure 2). When using a simple average-based aggregation, mean values of the aggregated datasets stayed the same, while mean values at the original resolutions, as discussed earlier, differed to begin with, with higher values observed at coarser pixel sizes (Figures 1 & 2). Among other statistics, NAIP's minimum values remained consistently low even after aggregation; however, for Sentinel-2 aggregation to MODIS resolution produced a positive minimum value though lower than that of MODIS (Figure 2).

Standard deviations of the aggregated images compared differently with native data distributions for NAIP versus Sentinel-2 (Figure 2). For NAIP, even after aggregation standard deviations remained

high, exceeding those of Sentinel-2, Landsat and MODIS at their native 10 m, 30 m, and 500 m resolutions, respectively (Figure 2). This evidence suggests that high heterogeneity in the finest-resolution NAIP data did not get fully dampened by the aggregation, even though it progressively decreased with larger pixel size. This could be again due to higher sensitivity to extreme values and broader overall range of values in the original fine-scale NAIP data (Figure 1). In contrast, for Sentinel-2, aggregation led to a somewhat lower standard deviation compared both to Landsat at 30m resolution and MODIS at 500m (Figure 2), suggesting a more excessive than expected homogenization of spectral variation with this artificial aggregation.

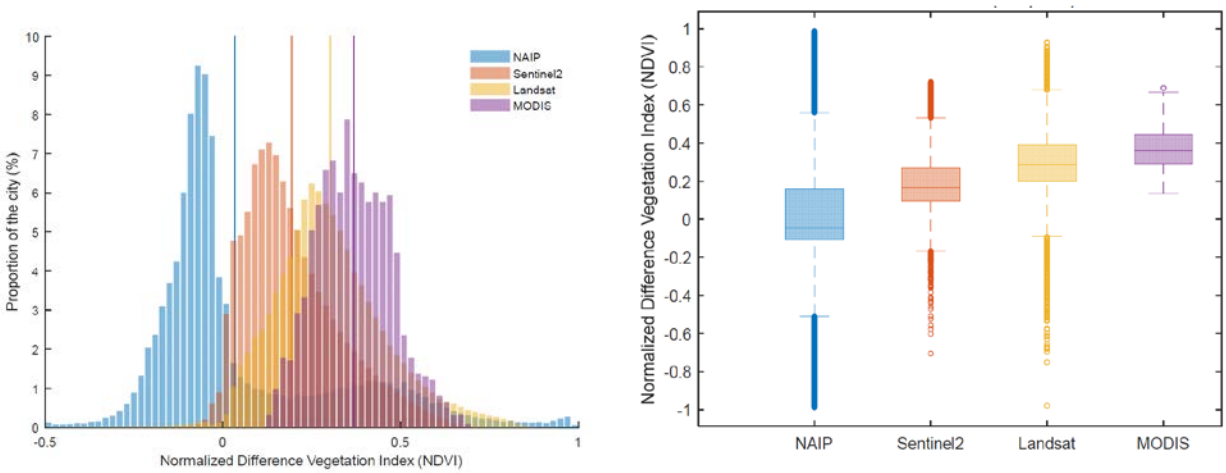


Figure 1. *Statistical distributions of NDVI from the four imaging products. The left panel shows for overlapping histograms with vertical lines indicating mean values in the respective colour of each dataset. The right panel shows the same distributions as boxplots with median values in boxes and outliers indicated as hollow points of the boxplot whiskers*

Table 2. The main summary statistics of the NDVI data values from the four imaging products

Input	Mean	Median	Maximum	Minimum	Standard deviation	#Pixels
NAIP	0.034	-0.048	0.990	-0.988	0.294	330644501
Sentinel-2	0.194	0.166	0.721	-0.706	0.135	2587940
Landsat-9	0.302	0.286	0.929	-0.979	0.158	289382
MODIS Terra	0.369	0.361	0.689	0.134	0.107	1231

Collectively, these preliminary results demonstrate that statistical distributions of NDVI greenness may show notable differences among popular imaging products, and that these differences cannot be solely attributed to contrasts in spatial resolution. While coarser pixels necessarily suppress some of the underlying landscape heterogeneity, we should remember that the original image products also differ in the sensor instruments, specific wavelength ranges used in NDVI computation (Table 1), specifics of data preprocessing, and some other parameters and procedures. All these differences can also ultimately contribute to the contrast in NDVI values and distributions even when controlling for spatial extent and timing of the image data collection. Such effects should be studied more in-depth in the future.

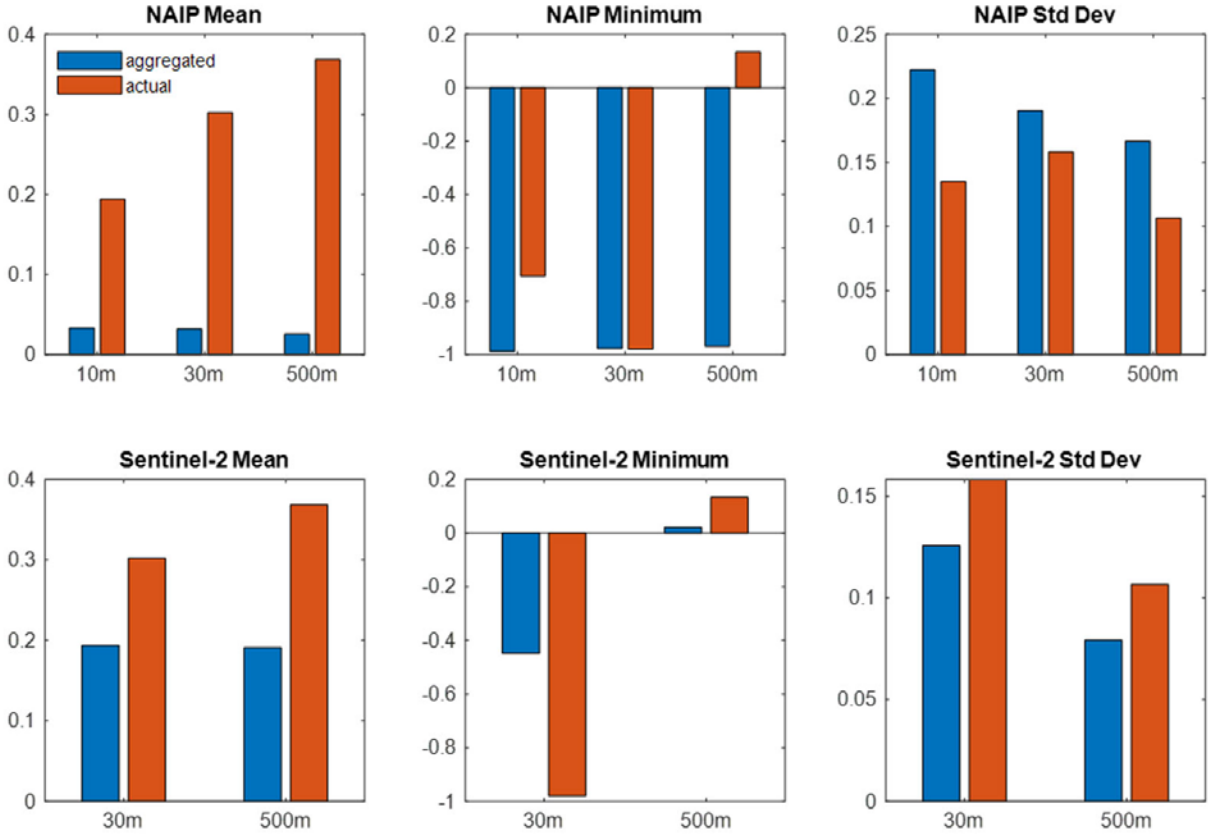


Figure 2. *Example of descriptive statistics (mean, minimum, and standard deviation) compared for the images of NAIP (upper three figures) and Sentinel-2 (lower three figures) aggregated to coarser pixel sizes of other sensors (Sentinel-2, Landsat, and MODIS for NAIP imagery; Landsat and MODIS for Sentinel-2). Blue bars represent statistics of the aggregated images, while red bars indicate the statistics of datasets with the equivalent native pixel size of that magnitude*

From a practical perspective, these findings imply that the magnitude and variation of remote sensing-derived greenness indicators in cities must be interpreted relative to both the source sensor product and its spatial resolution, echoing earlier concerns [1,5]. Meta-analyses, modeling studies, and other efforts working with NDVI data from different sources must proceed with high caution and explicitly account for such product-scale differences by using control variables, stratifying the analyses, and/or testing for the source-related group effects. As there is clearly a need for broader, more general guidance, future work should also measure urban NDVI scale- sensitivity across cities with different amount and configuration of green space and different bioclimatic contexts with different vegetation types. Such efforts may ultimately enable a generalizable framework would allow to more easily translate and calibrate the data among the relevant scales and products and reduce the abovementioned inference uncertainty.

References

[1] Jimenez RB, Lane KJ, Hutyra LR, Fabian MP. Spatial resolution of Normalized Difference Vegetation Index and greenness exposure misclassification in an urban cohort. J Expo Sci Environ Epidemiol 2022;32:213–22. https://doi.org/10.1038/s41370-022-00409-w

[2] Liu Y, Kwan M-P, Wong MS, Yu C. Current methods for evaluating people's exposure to green space: A scoping review. Soc Sci Med 2023;338:116303. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2023.116303

[3] Rojas-Rueda D, Nieuwenhuijsen MJ, Gascon M, Perez-Leon D, Mudu P. Green spaces and mortality: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. Lancet Planet Health 2019;3:e469–77. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30215-3

[4] Zipper SC, Schatz J, Singh A, Kucharik CJ, Townsend PA, Loheide SP. Urban heat island impacts on plant phenology: intra-urban variability and response to land cover. Environ Res Lett 2016;11:054023. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054023

[5] Tian J, Zhu X, Wu J, Shen M, Chen J. Coarse-Resolution Satellite Images Overestimate Urbanization Effects on Vegetation Spring Phenology. Remote Sens 2020;12:117. https://doi.org/10.3390/rs12010117

[6] De S, Das A, Mazumder TN. A systematic literature review of remote sensing approaches in urban green space research: Towards achieving sustainable development goals. Urban Clim 2025;59:102332. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102332

[7] Wellmann T, Lausch A, Andersson E, Knapp S, Cortinovis C, Jache J, et al. Remote sensing in urban planning: Contributions towards ecologically sound policies? Landsc Urban Plan 2020;204:103921.https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103921

[8] González-Marín A, Garrido-Cumbrera M. Assessing urban vegetation inequalities: Methodological insights and evidence. Ecol Inform 2025;86:102987. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102987

[9] Shahtahmassebi AR, Li C, Fan Y, Wu Y, Lin Y, Gan M, et al. Remote sensing of urban green spaces: A review. Urban For Urban Green 2021;57:126946. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126946

[10] Nouri H, Nagler P, Chavoshi Borujeni S, Barreto Munez A, Alaghmand S, Noori B, et al. Effect of spatial resolution of satellite images on estimating the greenness and evapotranspiration of urban green spaces. Hydrol Process 2020;34:3183–99. https://doi.org/10.1002/hyp.13790

[11] Li W, Ouyang Z, Zhou W, Chen Q. Effects of spatial resolution of remotely sensed data on estimating urban impervious surfaces. J Environ Sci 2011;23:1375–83. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60541-4

ЧУТЛИВІСТЬ ЗЕЛЕНОСТІ МІСЬКОГО ЛАНДШАФТУ ДО ПРОСТОРОВОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОПУЛЯРНИХ ПРОДУКТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Ірина ДРОНОВА
Університет Каліфорнії, Берклі
130 Mulford Hall #3114, Berkeley, CA 94720-3114, США
https://orcid.org/0000-0003-3339-3704

Анотація

Зростання застосувань дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) в міських ландшафтах відкрило нові можливості обчислення показників рослинного покриву за допомогою спектральних індексів зеленості. Однак, подальший розвиток таких досліджень ставить важливе питання щодо статистичної порівнюваності та надійності індикаторів зеленості між різними джерелами дистанційного зондування. У цьому дослідженні перевірено, наскільки змінюється статистичний розподіл популярного спектрального індикатора зеленості (нормалізований диференційний вегетаційний індекс, NDVI) серед знімків ДЗЗ з декількох популярних джерел у випадку, коли такі знімки отримані майже одночасно. На прикладі міста Сакраменто, Каліфорнія, США були отримані NDVI-метрики з чотирьох з супутникових і авіаційних продуктів ДЗЗ з просторовою роздільною здатністю 1 м, 10 м, 30 м та 500 м у майже однаковий час спостереження в червні 2022 року. Порівняння статистичних розподілів NDVI показало, що центральні значення мають тенденцію до поступового зростання зі збільшенням розміру пікселя, через що місто виглядає в середньому «зеленішим» на середніх і грубих роздільних здатностях, ніж на високих. Натомість показники дисперсії (стандартне відхилення), а також наявність високих і низьких екстремальних значень індексу зменшилися зі збільшенням просторової роздільної здатності. Агрегація високороздільних продуктів до грубішої роздільної здантості інших продуктів не призвела до еквівалентних статистичних розподілів. Таким чином, результати демонструють, що величину та варіацію індикаторів зеленості, отриманих за допомогою дистанційного зондування в містах, слід інтерпретувати з урахуванням як джерела сенсорного продукту, так і його просторової роздільної здатності. Майбутні дослідження повинні детальніше дослідити цю чутливість і розширити вибірку міст у різних біокліматичних регіонах. Це допоможе розробити узагальнені рекомендації щодо використання на калібрування даних ДЗЗ з різних джерел для майбутніх застосувань міських індикаторів рослинності.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі; міські ландшафти; спектральна зеленість; спектральні індекси рослинності; просторова роздільна здатність.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330353

ВСТАНОВЛЕННЯ СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОВУГЛЕЦЕВИХ КАТАЛІЗАТОРІВ ДЛЯ ПОТРЕБ ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ

Вікторія ДРОЩИНСЬКА[1], Ігор БИЧКО[2], Олена ІВАНЕНКО[1]
[1] *Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
[2]*Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського*
проспект Науки, 31, м. Київ, 03028, Україна
e-mail:vikadrocsynska@gmail.com

Анотація:
У роботі розглядається застосування нановуглецевих матеріалів як перспективних каталізаторів у контексті зеленої хімії, що спрямована на зменшення впливу хімічного виробництва на довкілля. Особливу увагу приділено структурним характеристикам наноматеріалів (розмірності, пористості, дефектності, хімії поверхні, легуванню гетероатомами) та їх взаємозв'язку з каталітичною активністю. Показано, що варіація цих параметрів дозволяє цілеспрямовано модифікувати властивості нановуглецевих каталізаторів, зокрема вуглецевих нанотрубок, графену, фулеренів і активованого вугілля, для підвищення їх ефективності в реакціях окиснення, гідрування, дегідрування тощо. Робота має на меті систематизацію знань щодо впливу структурних характеристик нановуглецевих речовин на їх каталітичну дію, що є актуальним для розвитку сталих, ресурсозберігаючих технологій.

Ключові слова: *нановуглецеві матеріали, зелена хімія, каталізатори, вуглецеві нанотрубки, графен, фулерени, функціоналізація, пористість, легування, хімічна реактивність, структурні дефекти.*

Зі зростанням усвідомлення екологічних проблем та необхідності переходу до сталого розвитку попиту набуває напрям зеленої хімії, яка спрямована на розробку хімічних процесів і продуктів, які мінімізують використання і генерацію небезпечних речовин.

"Зелена хімія", концепція, що ставить собі за мету зниження або повне припинення використання і отримання речовин, що становлять небезпеку для навколишнього середовища і людського здоров'я [1].

Нановуглецеві матеріали, завдяки своїм унікальним властивостям, стають одними з найперспективніших каталізаторів в цій області. Їх висока провідність, велика площа поверхні і можливість модифікації дозволяють створювати ефективні і стійкі каталізатори, які можуть використовуватися в різних екологічно чистих процесах, таких як фотокаталітичне розкладання забруднюючих речовин або синтез біопалива.

Одним з основних напрямків у використанні нановуглецевих матеріалів у зеленій хімії є їх використання як каталізаторів у хімічних реакціях. Завдяки своїй великій поверхні та електронній структурі, нановуглецеві матеріали можуть значно підвищити швидкість реакцій та їхню вибірковість. Наприклад, вуглецеві нанотрубки можуть бути використані у процесах окислення або відновлення, зменшуючи кількість відходів і токсичних побічних продуктів [2].

Мета роботи – встановити структурні характеристики нановуглецевих каталізаторів з метою визначення їх впливу на каталіз у реакціях зеленої хімії та зрозуміти їх властивості для екологічно безпечного та енергоефективного хімічного синтезу.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні взаємозв'язків між структурними параметрами нановуглецевих матеріалів (розміром пор, ступенем дефектності, функціональними групами) та їх каталітичною активністю в реакціях зеленої хімії, що дозволяє цілеспрямовано модифікувати їх для підвищення ефективності екологічно чистих процесів.

Нанорозмірні вуглецеві структури можуть існувати у нуль-, одно- та двовимірному просторі, що глибоко впливає на характер зв'язку та розташування атомів вуглецю, а також на формування тривимірних нановуглецевих структур. Визначення нановуглецю на основі розміру охоплює широкий спектр матеріалів з різноманітними властивостями. Розмірність, у свою чергу, є фундаментальним способом класифікації та розуміння їх поведінки під час використання.

Порівняння структурних характеристик нановуглецевих каталізаторів з результатами інших досліджень є важливим завданням, яке дозволяє не тільки оцінити ефективність розроблених каталізаторів, але й зрозуміти, як різні фактори впливають на їх каталітичні властивості. Нановуглецеві матеріали, такі як графен, вуглецеві нанотрубки та фулерени, зарекомендували себе як перспективні каталізатори завдяки своїй унікальній мікроструктурі, високій поверхні та можливості модифікації [3].

При порівнянні структурних характеристик нановуглецевих каталізаторів важливо враховувати методи синтезу, так як різні підходи, такі як хімічне осадження з газу, механохімічний синтез або гідротермальний синтез, які можуть призводити до відмінностей в розмірах частинок, формах і ступеня кристалічності каталізаторів.

Так, каталізатори, отримані методом хімічного осадження, частіше мають більш однорідні розміри і форми в порівнянні з тими, що виготовлені природним чином. Це проявляється, наприклад, у дослідженнях, де графенові оксиди демонструють високу реакційну здатність завдяки максимальній доступності активних центрів.

Навіть невеликі зміни в структурі носіїв можуть призвести до значних змін каталітичної ефективності. Це підкреслює важливість вибору матеріалу носія, який буде не тільки стабільним, але і сприяє необхідним кінетичним процесам.

Отримані дані про структурні характеристики нановуглецевих каталізаторів можуть свідчити про їх високу активність і селективності в реакціях [2]. У зеленій хімії використання стійких каталізаторів дозволяє зменшити відходи та знизити споживання ресурсів. Наприклад, якщо нановуглецеві каталізатори демонструють високу ефективність у реакціях гідрування, це може призвести до розробки більш чистих та економічно вигідних технологічних процесів.

Ще одним важливим полем застосування нановуглецевих матеріалів у зеленій хімії є їх використання у розробці нових, безвідходних методів синтезу. Завдяки їхній здатності взаємодіяти з різноманітними молекулами на нано- та мікромасштабі, вуглецеві нанотрубки й графен можуть бути інтегровані в процеси, що дозволяють зменшити потребу в небезпечних реагентах та підвищити ефективність хімічних реакцій [4].

В цілому, нановуглецеві матеріали здатні витіснити традиційні матеріали у багатьох аспектах хімічного виробництва та обробки, надаючи нові можливості для створення екологічно чистих технологій. Впровадження цих матеріалів у зелений хімічний підхід сприяє зниженню негативного впливу на довкілля, енергоефективності, а також покращенню якості та безпеки продукції. Це робить дослідження та розвиток нановуглецевих матеріалів вкрай актуальним у контексті сталого розвитку та збереження екологічного балансу.

Один із прикладів застосування гомогенних каталізаторів в зеленій хімії - використання комплексу перехідного металу для окислення пара-ксилолу до терефталевої кислоти, ефіри якої служать основою виробництва поліефірних волокон [5].

Серед нановуглецевих каталізаторів можна виділити кілька типів: вуглецеві нанотрубки (ВНТ), графен і наночастинки вуглецю, наприклад, фулерени та активоване вугілля.

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) є одновимірними наноматеріалами з порожнистою циліндричною структурою, утвореною згорнутими листами графену. Вони поділяються на одностінні вуглецеві нанотрубки та багатостінні вуглецеві нанотрубки залежно від кількості шарів графену. ВНТ характеризуються високим співвідношенням сторін, великою питомою площею поверхні, відмінною електронною провідністю та механічною міцністю, що робить їх перспективними носіями каталізаторів. Вуглецеві нанотрубки поділяються на одностінні та багато стінні, відмінність між якими є критичною, оскільки призводить до різних фізичних та хімічних властивостей, що впливає на їхню ефективність у конкретних каталітичних реакціях [6].

Вуглецеві нанотрубки демонструють високу механічну міцність і термостійкість, що робить їх придатними для використання в умовах високих температур. Це відкриває нові можливості для їх застосування в каталітичних реакціях, де стабільність матеріалу є критично важливою [7].

Графен являє собою двовимірний моношар sp^2-гібридизованих атомів вуглецю, розташованих у гексагональній кристалічній решітці. Він володіє винятковими властивостями, включаючи велику площу поверхні, високу електричну та теплову провідність, а також механічну гнучкість. Двовимірна структура графену забезпечує максимальну площу поверхні, що робить його високоефективним для каталізу [8].

Фулерени – це нульвимірні кліткоподібні структури, що складаються з атомів вуглецю, потенційно можуть застосовуватися як каталізатори або прекурсори каталізаторів та мають унікальні можливості в гомогенному каталізі [9].

Активоване вугілля є високопористим вуглецевим матеріалом з великою площею поверхні, використовується як носій каталізаторів та відрізняється гнучкістю у налаштуванні фізичних (площа поверхні, пористість) та хімічних (поверхневі функціональні групи) властивостей. Залишається широко використовуваним та економічно вигідним варіантом для носіїв каталізаторів завдяки своїй регульованій пористості та хімії поверхні.

Методи синтезу різних типів нановуглецю включають хімічне осадження з парової фази (CVD), дуговий розряд, лазерну абляцію та піроліз. Спостерігається тенденція до зростання використання відновлюваної та дешевшої сільськогосподарської сировини для синтезу нановуглецевих матеріалів. Метод синтезу значно впливає на структурні характеристики отриманого нановуглецевого матеріалу, що, у свою чергу, визначає його каталітичну ефективність.

Висока площа поверхні є важливою для забезпечення великої кількості активних центрів для каталітичних реакцій. Нанометрові розміри нановуглецевих матеріалів за своєю природою призводять до високого співвідношення площі поверхні до об'єму. Також відіграє важливу роль у збільшенні доступної площі поверхні пористість. Більша площа поверхні зазвичай

призводить до вищої каталітичної активності завдяки збільшенню кількості реакційних центрів. Пористість ще більше це підвищує, забезпечуючи кращий доступ реагентів до цих центрів.

Розподіл пор за розмірами та їхній взаємозв'язок у вуглецевих наноматеріалах впливають на дифузію реагентів та продуктів до/від активних центрів. Різні розміри пор (мікропори, мезопори, макропори) мають переваги для конкретних реакцій. Існує можливість регулювання пористості нановуглецю за допомогою контрольованого синтезу та методів активації. Оптимізована пориста структура забезпечує ефективне масоперенесення, запобігаючи дифузійним обмеженням та максимізуючи ефективність активних центрів.

Структурні дефекти в кристалічній решітці графену нановуглецю, такі як крайові атоми, можуть виступати як активні каталітичні центри. Атоми вуглецю в місцях дефектів мають підвищену реакційну здатність через змінену електронну структуру. Існує можливість навмисного введення та контролю дефектів для підвищення каталітичної ефективності для створення високоефективних каталітичних центрів у даних матеріалах.

Наявність різних функціональних груп на поверхні нановуглецю впливає на їхню хімічну реакційну здатність та каталітичну активність. Хімію поверхні нановуглецевих матеріалів можна модифікувати шляхом функціоналізації конкретними хімічними групами для налаштування їхніх каталітичних властивостей для певних реакцій. Важливу роль у деяких каталітичних процесах відіграють оксигеновмісні функціональні групи, тоді як поверхневі функціональні групи є вирішальними для регулювання хімічної реакційної здатності нановуглецевих каталізаторів, дозволяючи їм ефективно взаємодіяти з реагентами.

Легування нановуглецевих речовин гетероатомами, такими як азот, бор, фосфор, сірка та кисень, може значно змінити їхні електронні властивості та створити активні центри для каталізу. Різні типи легування азотом (наприклад, піридиновий N, пірольний N, графітовий N) мають специфічний вплив на каталітичну активність. Існують приклади нановуглецевих матеріалів, легованих гетероатомами, що демонструють підвищену каталітичну ефективність у різних реакціях. Легування гетероатомами є потужною стратегією для підвищення каталітичної активності шляхом модифікації електронної структури та введення нових типів активних центрів.

У гетерогенному каталізі є важливою взаємодія між металевими наночастинками та нановуглецевим носієм, адже він може впливати на дисперсію, стабільність та електронні властивості нанесених металевих наночастинок. Вибір нановуглецевого носія та характер його взаємодії з металевими наночастинками є критичними факторами, що визначають загальну ефективність та стабільність нанесених металевих каталізаторів.

Останні дослідження та приклади доводять взаємозв'язок між певними структурними характеристиками нановуглецевих каталізаторів та їхньою ефективністю в ключових реакціях зеленої хімії. Так, регулювання розміру пор та площі поверхні пористих вуглецевих матеріалів впливає на їхню ефективність в адсорбції та каталізі. Легування гетероатомами, таке як легування азотом ВНТ та графену, підвищує їхню електрокаталітичну активність для реакції відновлення кисню та інших реакцій. Дефекти та функціональні групи на поверхнях нановуглецевих речовин сприяють їхній каталітичній активності в реакціях окиснення, гідрування та дегідрування. Нановуглецеві носії відіграють важливу роль у підвищенні активності та стабільності металевих наночастинок у таких реакціях, як гідрування нітроароматичних сполук та відновлення CO_2.

Для визначення та аналізу структурних характеристик нановуглецевих каталізаторів використовують різноманітні методи та інструменти.

Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) та просвічувальна електронна мікроскопія (TEM) використовуються для візуалізації морфології, розміру та розподілу нановуглецевих матеріалів. TEM високої роздільної здатності (HRTEM) дозволяє досліджувати атомну структуру та виявляти дефекти. Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDX), що поєднується з електронною мікроскопією, застосовується для визначення елементного складу. Електронна мікроскопія надає прямі візуальні докази наноструктури вуглецевих матеріалів, що є вирішальним для розуміння їхньої морфології та ідентифікації структурних особливостей, важливих для каталізу [10].

Рентгенівська дифракція (XRD) використовується для визначення кристалічної структури, ідентифікації фаз та оцінки розміру кристалітів нановуглецевих матеріалів. XRD також може бути використана для виявлення дефектів та аналізу ступеня графітизації вуглецевих матеріалів. У цілому XRD надає цінну інформацію про об'ємну кристалічну структуру нановуглецю, доповнюючи локалізовану інформацію, отриману за допомогою мікроскопії. Тоді як раманівська спектроскопія є високочутливою до коливальних мод вуглецевих матеріалів і надає інформацію про їхню структуру, дефекти та ступінь графітизації (рис. 1).

Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (XPS) використовується для визначення елементного складу поверхні нановуглецю, ідентифікації хімічних станів елементів та аналізу наявності функціональних груп.

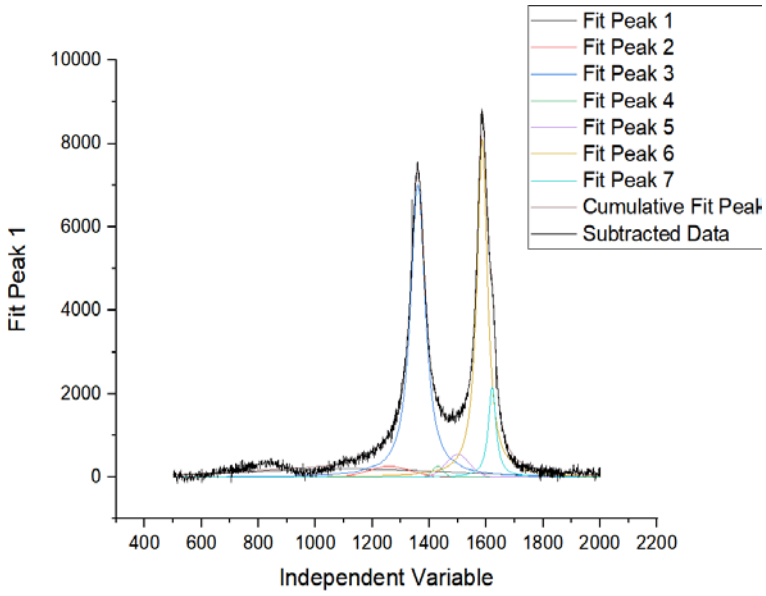


Рис. 1. Раманівський спектр зразку вуглецевих нанотрубок

Фур'є-спектроскопія в інфрачервоній області (FTIR) застосовується для ідентифікації типів функціональних груп, присутніх на поверхні наноструктурованих вуглецевих матеріалів. Ці спектроскопічні методи надають детальну інформацію про хімію поверхні, зв'язки та дефектну структуру нановуглецевих каталізаторів, що є важливим для розуміння їхньої каталітичної поведінки.

Аналіз за методом Брунауера-Еммета-Теллера (BET) використовується для визначення питомої площі поверхні та розподілу пор за розмірами нановуглецевих матеріалів. Аналіз BET надає кількісні дані про площу поверхні та пористість, які є критичними параметрами для оцінки потенціалу нановуглецїв як каталізаторів та носіїв каталізаторів.

Існують також інші методи, як нейтронна дифракція, рентгенівська абсорбційна спектроскопія (XAS), сканувальна тунельна мікроскопія (STM) та атомно-силова мікроскопія (AFM), які можуть надати додаткові відомості про структуру нановуглецевих каталізаторів. Для отримання вичерпного розуміння складної структури нановуглецевих каталізаторів часто необхідне поєднання різних методів характеристики [11].

При порівнянні структурних характеристик нановуглецевих каталізаторів важливо враховувати методи синтезу, такі як хімічне осадження з газу, механохімічний синтез або

гідротермальний синтез, які можуть призводити до відмінностей в розмірах частинок, формах і ступеня кристалічності каталізаторів. Каталізатори, отримані методом хімічного осадження, частіше мають більш однорідні розміри і форми в порівнянні з тими, що виготовлені природним чином. Це проявляється, наприклад, у дослідженнях, де графенові оксиди демонструють високу реакційну здатність завдяки максимальній доступності активних центрів.

Навіть невеликі зміни в структурі носіїв можуть призвести до значних змін каталітичної ефективності. Це підкреслює важливість вибору матеріалу носія, який буде не тільки стабільним, але і сприяє необхідним кінетичним процесам.

Залишаються певні виклики у розробці, синтезі та застосуванні нановуглецевих каталізаторів для потреб зеленої хімії. Існують можливості для подальшої оптимізації структурних характеристик даних каталізаторів для досягнення ще вищої активності, селективності та стабільності. Потенційні напрямки для подальших досліджень включають: розробку більш точних методів контролю синтезу вуглецевих наноматеріалів з конкретними структурними особливостями; глибше розуміння природи активних центрів у безметалевих нановуглецевих каталізаторах; розробку ефективніших та довговічніших одноатомних каталізаторів, нанесених на нановуглець; дослідження використання нових нановуглецевих структур та композитів для синергетичних каталітичних ефектів; розробку методів характеристики для кращого розуміння структурних змін нановуглецевих каталізаторів в умовах реакції; використання комп'ютерного моделювання та машинного навчання для прогнозування та розробки нових нановуглецевих каталізаторів з бажаними властивостями.

Майбутні дослідження повинні бути зосереджені на досягненні більшого контролю над структурними характеристиками нановуглецевих каталізаторів, отриманні фундаментальних знань про їхні каталітичні механізми та дослідженні нових матеріалів і підходів для ще більш ефективних та стійких зелених хімічних процесів.

Універсальність та потенціал нановуглецевих каталізаторів у вирішенні різноманітних екологічних та енергетичних проблем за допомогою стійких хімічних перетворень є очевидними. Подальші дослідження та розробки в цій галузі залишаються надзвичайно важливими для досягнення більш екологічного та стійкого майбутнього.

Література

1. Cai W., Zhang H. Functional Nanomaterials for Sensing and Detection (2nd Edition). *Nanomaterials*. 2025. Vol. 15, no. 8. P. 588.
URL: https://doi.org/10.3390/nano15080588 (дата звернення: 25.04.2025).

2. Nanostructured Carbon Materials for Catalysis. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2015.
URL: https://doi.org/10.1039/9781782622567 (дата звернення: 15.04.2025).

3. Surface and Interfacial Engineering for Multifunctional Nanocarbon Materials / Y. Sun et al. *ACS Nano*. 2025.
URL: https://doi.org/10.1021/acsnano.4c14128 (дата звернення:01.05.2025).

4. Carbon Nanostructured Materials: Synthesis, Characterization, and Industrial Applications / A. Khovavko et al. Springer, 2024.

5. Basiuk E. V., Basiuk V. A. Green Chemistry of Carbon Nanomaterials. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2014. Vol. 14, no. 1. P. 644–672.
URL: https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9011 (дата звернення: 05.05.2025).

6. M. Filchakova, V. Saik. Single-walled Carbon Nanotubes: Structure, Properties, Applications. Carbon nanotube supplier – 97% of the global SWCNT *market*. URL: https://tuball.com/articles/single-walled-carbon-nanotubes (дата звернення: 20.04.2025).

7. Charged Carbon Nanomaterials: Redox Chemistries of Fullerenes, Carbon Nanotubes, and Graphenes / A. J. Clancy et al. *Chemical Reviews*. 2018. Vol. 118, no. 16. P. 7363–7408. URL: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00128 (дата звернення: 01.05.2025).

8. Navalón S., Ong W.-J., Duan X. Sustainable Catalytic Processes Driven by Graphene-Based Materials. *Processes*. 2020. Vol. 8, no. 6. P. 672.
URL: https://doi.org/10.3390/pr8060672 (дата звернення: 15.04.2025).

9. Structural Studies of Giant Empty and Endohedral Fullerenes / S. Wang та ін. *Frontiers in Chemistry*. 2020. Vol. 8.
URL: https://doi.org/10.3389/fchem.2020.607712 (дата звернення: 25.04.2025).

10. Preparation and characterization of nanocarbons from *Nicotiana tabacum stems* / C. Chivimbiso Musuna-Garwe et al. *AIMS Materials Science*. 2018. Vol. 5, no. 6. P. 1242–1254.
URL: https://doi.org/10.3934/matersci.2018.6.1242 (дата звернення: 05.05.2025).

11. Belin T., Epron F. Characterization methods of carbon nanotubes: a review. *Materials Science and Engineering: B.* 2005. Vol. 119, no. 2. P. 105–118.
URL: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2005.02.046 (дата звернення: 05.05.2025).

DETERMINATION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF NANOCARBON CATALYSTS FOR GREEN CHEMISTRY NEEDS

Viktoriia DROSHCHYNSKA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
https://orcid.org/0009-0002-0595-0323

Igor BYCHKO
L. V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4164-3024

Olena IVANENKO
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6838-5400

Abstract

The paper discusses the use of nanocarbon materials as promising catalysts in the context of green chemistry, which is aimed at reducing the environmental impact of chemical production. Particular attention is paid to the structural characteristics of nanomaterials (dimensionality, porosity, defectivity, surface chemistry, heteroatom doping) and their relationship with catalytic activity. It has been shown that the variation of these parameters allows for the purposeful modification of the properties of nanocarbon catalysts, in particular carbon nanotubes, graphene, fullerenes, and activated carbons, to improve their efficiency in oxidation, hydrogenation, dehydration, etc. reactions. The work aims to systematize the knowledge on the influence of the structural characteristics of nanocarbon substances on their catalytic action, which is relevant for the development of sustainable, resource-saving technologies.

Keywords: nanocarbon materials, green chemistry, catalysts, carbon nanotubes, graphene, fullerenes, functionalization, porosity, doping, chemical reactivity, structural defects.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331169

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ОТРИМАННЯ КАРБОНІЗОВАНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ БІОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ СИРОВИНИ

Ольга ЗАБНЄВА[1], Дмитро ПІНЧУК[2], Сергій СМОЛІН[1], Ольга ШВИДЕНКО[1]
[1]*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України*
бульв. Вернадського 42, Київ, 03142, Україна
[2]*Київський політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорского*
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: zabov369@gmail.com

Анотація
В роботі описано процес отримання біовугілля з різних видів біовідновлювальної сировини (березової деревини, шкаралупи волоського горіху). Представлено результати аналізу фізико-хімічних та сорбційних характеристик карбонізованого матеріалу. Показано вплив температурних режимів на зародження мікропористості та перспективність використання біовугілля для отримання ефективного адсорбційного матеріалу, як альтернативи сорбентам на основі викопного вугілля.

***Ключові слова**: біовугілля, карбонізація, сорбент, пористість, сировина.*

Одним із актуальних напрямів сучасної науки є розробка ефективних і екологічно безпечних адсорбентів з відновлюваної сировини [1]. Зростаючий попит на сорбційні матеріали, зокрема в екологічних та водоочисних технологіях, актуалізує питання заміни викопного вугілля альтернативними матеріалами [2,3]. На сьогодні біовугілля, отримане в процесі піролізу органічної сировини, є одним із найбільш перспективних варіантів завдяки низькій вартості, доступності сировини та задовільним сорбційним властивостям [4,5].

Мета роботи – дослідити вплив температури піролізу, часу витримки та виду біовідновлюваної сировини (березова деревина та шкаралупа волоського горіху) на фізико-хімічні та сорбційні характеристики карбонізованого матеріалу, з метою подальшого використання його як потенційного сорбенту.

Наукова новизна полягає у встановленні залежності між структурою сировини та пористістю одержаного біовугілля, а також в оцінці впливу температурно-часових параметрів піролізу на сорбційну активність матеріалу.

В якості сировини були обрані відходи обробки деревини, а саме берези, та побічний продукт переробки волоського горіху (шкаралупи), які є досить поширеними на території України. Так як береза відноситься до м'яких порід дерев, а шкаралупа є щільним і твердим матеріалом, це дозволить оцінити вплив структури початкової сировини на фізико-хімічні та структурні характеристики отриманого біовугілля [6].

Піроліз здійснювали в спеціально створеній лабораторній установці, у закритій атмосфері (інертне середовище, без доступу повітря). Швидкість нагріву становила приблизно 10 °С $хв^{-1}$.

Процес обробки вихідної сировини включав попереднє подрібнення, просіювання і завантаження у блок сушки, в який подають теплоносій з топки. Після одержання піролізних газів процес спалювання ведуть автономно без використання сторонніх продуктів горіння. Вихідний біоматеріал сушать при температурі 60-250 ºС. Далі висушений біоматеріал переміщують в блок піролізу. Піроліз проводять при температурі 400-800 ºС. У блоці піролізу відбувається газифікація і утворення біовугілля, яке в подальшому охолоджується сухим способом в інертній атмосфері.

Визначення фізико-хімічних характеристик проводили відповідно до стандартів ISO та ASTM, зокрема: вологість (ISO 18134-2), зольність (ISO 18122), адсорбційну активність за метиленовим синім (ASTM D4607) та йодом (ASTM D4607-94).

Кожне визначення проводили у трьох паралельних дослідах. Статистичну обробку здійснювали з використанням критерію Стьюдента ($p<0,05$).

У межах цього дослідження визначали вплив фракційного складу та виду вихідної сировини на фізико-хімічні характеристики отриманого карбонізованого продукту: отриманий із березової тріски – кусковий (БК) та порошкоподібний (БПп); отриманий при різних температурах (410, 650, 800 ºС) та часу (1, 2, 3 год) піролізу із шкаралупи волоського горіху – подрібнений (ШП) (ШП410-1, ШП650-1, ШП650-2, ШП650-3, ШП800-1 та ШП800-2). Фізико-хімічні характеристики отриманих карбонізованих продуктів представлені в таблиці.

Таблиця 1. Фізико-хімічні характеристики карбонізованих продуктів, отриманих із березової тріски та шкаралупи волоського горіху

Карбонізо-ваний продукт	**Фракція, мм**	**Вологість, %**	**Насипна щільність, г $см^{-3}$**	**Зольність, %**	**Адсорбційна активність за:**	
					йодом, мг $г^{-1}$	**метиленовим синім, мг $г^{-1}$**
БК650-1	0,25-2,0	7,5	0,17	2	254	85
БПп650-1	<0,1	6,9	0,43	6	268	130
ШП410-1	0,5-2,2	<1	0,56	1,5	85	<2
ШП650-1			0,55		250	
ШП650-2			0,55		290	
ШП650-3			0,55		290	
ШП800-1			0,53		340	
ШП800-2			0,53		410	

Встановлено, що фракційний склад та вид початкової сировини впливають на фізико-хімічні та структурні властивості отриманого біовугілля. Досліджуваний температурний режим дозволяє отримувати початкову мікропористість карбонізованого матеріалу. Біовугілля на основі березової деревини має наявність більш широких мікропор (супермікропор), ніж у випадку твердішої за структурою шкаралупи. Збільшення часу піролізу не призводить до суттєвого зростання адсорбційної активності та появи нових супермікропор.

Таким чином отримані дані свідчать про перспективність застосування отриманого карбонізованого матеріалу як бази для створення активованого сорбенту.

Література

1. Bae W., Kim J., Chung J. Production of granulated activated carbon from food-processing wastes (walnut shells and jujube seeds) and its adsorptive properties. J. Air Waste Manag. Assoc. 2014. **64**(8). P. 879–886.

2. Vale A. C., Leite L., Pais V., Bessa J., Cunha F., Fangueiro R. Extraction of natural-based raw materials towards the production of sustainable man-made organic fibres. Polymers. 2023. **15**(13). P. 2873. DOI: 10.3390/polym15132873

3. Noor A., Khan S. A. Agricultural wastes as renewable biomass to remediate water pollution. Sustainability. 2023. **15**(5). P. 4084. DOI: 10.3390/su15054084

4. Ahmad F., Daud W. M. A. W., Ahmad M. A., Radzi R. Cocoa (Theobroma cacao) shell-based activated carbon by CO_2 activation in removing of cationic dye from aqueous solution: Kinetics and equilibrium studies. Chem. Eng. Res. Des. 2012. **90**. P. 1480–1490.

5. Adsorption [Електронний ресурс] // Encyclopaedia Britannica. – Оновлено: 5 березня 2025. – Режим доступу: https://www.britannica.com/technology/adhesive

6. MyGreenLid. (n.d.). Birch Trees & Sustainability. Retrieved June 2, 2025, from https://www.mygreenlid.com/post/birch-trees-sustainability

CONDITIONS RESEARCH OF OBTAINING CARBONIZED MATERIAL FROM BIO RENEWABLE RAW MATERIALS

Olga ZABNEVA
A.V. Dumansky Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry NAS of Ukraine
Academician Vernadsky blvd., 42, Kyiv, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-4670-085X

Dmytro PINCHUK
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-3398-4355

Serhii SMOLIN
A.V. Dumansky Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry NAS of Ukraine
Academician Vernadsky blvd., 42, Kyiv, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-5026-6339

Olga SHVYDENKO
A.V. Dumansky Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry NAS of Ukraine
Academician Vernadsky blvd., 42, Kyiv, 03142, Ukraine
https://orcid.org/0009-0002-4272-2899

Abstract

The paper describes the process of obtaining biochar from various types of biorenewable raw materials (birch wood, walnut shells). The results of the analysis of the physicochemical and sorption characteristics of the carbonized material are presented. The influence of temperature regimes on the genesis of microporosity and the prospects of using biochar to obtain an effective adsorption material as an alternative to sorbents based on fossil coal are shown.

Keywords: biochar, carbonization, sorbent, porosity, raw material.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330388

КАТАЛІТИЧНИЙ ШВИДКИЙ ПІРОЛІЗ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Олена ІВАНЕНКО[1], Богдан КОРІНЕНКО[2], Ігор БИЧКО[3],
Кароліна ВОЙТЕНКО[1], Артем МАРТИНЮК[1]
[1]Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, Україна
[2]Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім В. П. Кухаря НАН України
вулиця Академіка Кухаря, 1, Київ, 02000, Україна
[3]Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського
проспект Науки, 31, Київ, 03028, Україна
e-mail: korzhenevskayakarolina@gmail.com

Анотація

Показана та обґрунтована доцільність переробки полімерних відходів, зокрема поліетилену високої щільності (ПЕВЩ), методом каталітичного піролізу з метою отримання альтернативних джерел енергії: синтез-нафти, піролізних газів та пірокарбону. Досліджена термодеструкція відходів ПЕВЩ на установці періодичної дії за відсутності кисню повітря із застосуванням каталізаторів (Ni/MgO, Fe_2O_3, Ni/CaO, Fe_3O_4, HY, аскарит) та без них. Встановлено, що проведення каталітичного піролізу в температурному діапазоні 450 °C сприяє підвищенню виходу рідких вуглеводнів, зокрема синтез-нафти, а також покращенню якісного складу отриманих фракцій. Визначено, що застосування каталізаторів сприяє зменшенню вмісту твердого залишку та підвищенню виходу газової суміші.

Ключові слова: *поліетилен високої щільності, піроліз, каталізатори, піролізна рідина, пірокарбон.*

ПЕВЩ є хімічно інертним матеріалом, що забезпечує його тривалий термін експлуатації, але водночас створює серйозну проблему, коли мова йде про його переробку. Він майже не піддається біологічному розкладу. У природних умовах його деградація може тривати від 100 до 500 років, залежно від умов середовища (температура, вологість, вплив ультрафіолету). Це означає, що більшість виробів з ПЕВЩ, які були вироблені десятки років тому, все ще перебувають на сміттєзвалищах або в океані.

Каталітичний піроліз є вдосконаленим підходом, який передбачає використання каталізаторів для зниження температури процесу, підвищення виходу рідких вуглеводнів і покращення якості кінцевих продуктів. Вплив каталізаторів на механізм розкладу ПЕВЩ має вирішальне значення, оскільки дозволяє контролювати розподіл отриманих фракцій та мінімізувати утворення небажаних побічних речовин [1].

Піроліз поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) може відбуватися у двох основних режимах: звичайному (повільному) та швидкому. Основна різниця між ними полягає в швидкості нагріву, температурному режимі, виході продуктів та їх складі.

Звичайний піроліз, що відбувається при температурі 600-800 °С, здатен скоротити час реакції, але кінцевими продуктами його проведення є газоподібні речовини та більш легкі вуглеводні, при цьому вихід газу зростає з підвищенням температури. Порівняно низькотемпературний піроліз при температурі 400-500 °С, при якому витрачається менше енергії, забезпечує переважно маслянистий матеріал в якості кінцевого продукту проведення процесу (рис. 1).

При термічному розкладанні полімерів одночасно протікають два типи реакцій. Перша є випадковим розривом хімічних зв'язків, що призводить до зміни молекулярної маси і відновлення структури полімеру.

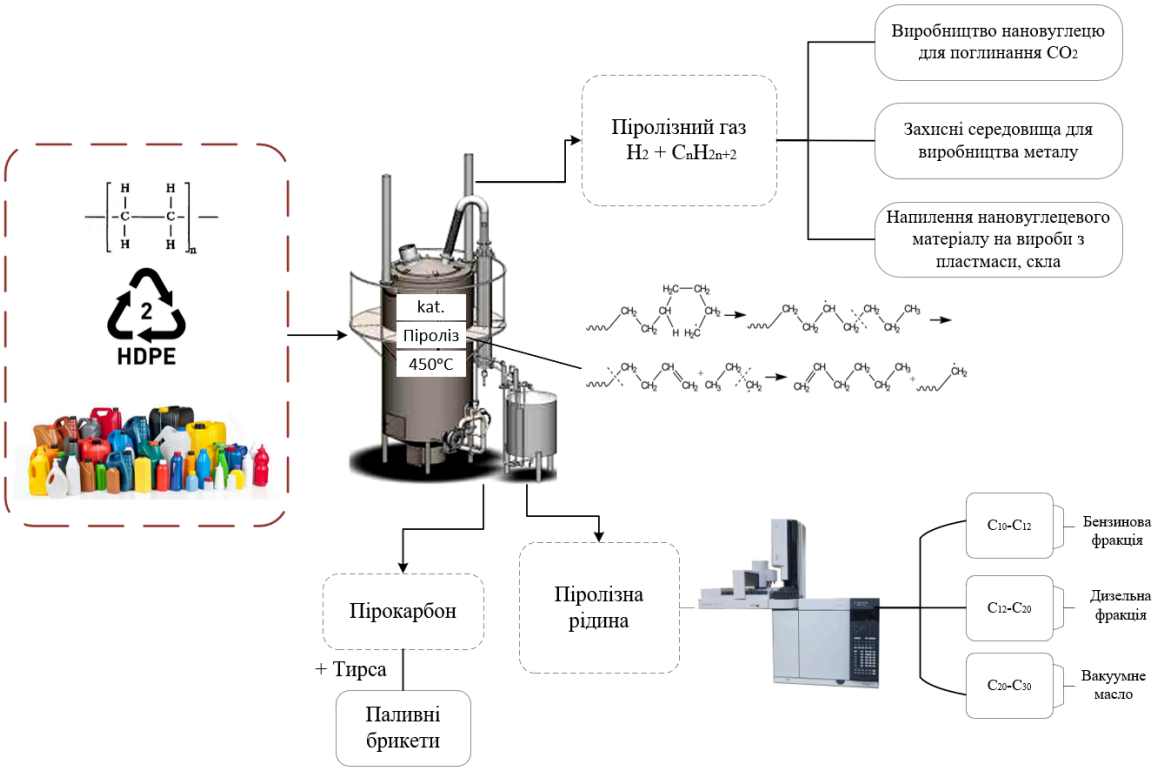


***Рис.1**. Переробка і подальше використання продуктів переробки поліетилену високої щільності*

Друга реакція пов'язана з розривом подвійних вуглецевих зв'язків, що призводить до утворення летких сполук. Аналіз складу та продуктів піролізу дозволяє зрозуміти механізми термічного розпаду полімерів.

Розкладання полімерів може відбуватися двома шляхами: механізм розриву ланцюга на кінцях молекули або випадкового розпаду всередині полімерної структури. У разі розкладання на кінцях ланцюга відбувається послідовне вивільнення мономірних ланок, що також називають деполімеризацією. Цей процес протікає за вільнорадикальним механізмом і є зворотним етапом полімеризації.

За такого типу розкладання молекулярна маса полімеру поступово зменшується, а основним продуктом реакції є мономери. Даний механізм можливий, якщо основні зв'язки у

полімері слабші, ніж зв'язки бічних груп. Він спостерігається тільки у полімерних молекул, що мають активні кінцеві групи, такі як вільні радикали, катіони або аніони.

Швидкий піроліз представляє собою термічний розклад органічних сполук за відсутності кисню, що відбувається при температурах 400–600 °C за доволі короткий проміжок часу. При цьому процесі полімерні ланцюги розпадаються, утворюючи газоподібні (H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_6 тощо), рідкі продукти (піролізне масло) і тверді залишки, серед яких знаходиться пірокарбон, який складається з елементарного вуглецю та мінеральних домішок (рис. 1).

Особливістю процесу є формування пірокарбону – твердої вуглецевої речовини, яка утворюється внаслідок неповного розкладу органічних полімерів та подальшої полімеризації вуглецевих радикалів. Каталізатори (Ni/MgO, Ni/CaO, Fe_3O_4, Fe_2O_3, Аскарит, HY) відіграють важливу роль у регулюванні процесу розкладу та сприяють прискоренню реакцій утворення пірокарбону. Каталізатор – це речовина, яка вступає в хімічну реакцію та виходить з неї без змін, збільшуючи ймовірність цієї реакції. Каталізатор утворює нестабільний комплекс з реагентами, який на наступному етапі розпадається на необхідні продукти та каталізатор. Енергія активації цих процесів нижча, ніж енергія активації некаталітичних реакцій. Зниження енергії активації дозволяє проводити реакції в більш м'яких умовах, наприклад, при більш низьких температурах або при нормальному (атмосферному) тиску. Каталіз не зміщує рівноваги реакції, а лише прискорює її встановлення [2, 3].

Найефективніший каталізатор Аскарит, який завдяки найвищій температурі реактора забезпечує високий вихід рідини та високу стабільність. Найменш ефективний каталізатор є ПЕВЩ + HY через помірні температури та стабільність, що призводять до середнього виходу рідини, а також при відсутності використання каталізаторів процес відбувається повільно і неефективно, рекомендується використовувати каталізатори при виборі методу термічного розщеплення ПЕВЩ, а саме високотемпературному піролізі. ПЕВЩ + Fe_2O_3, ПЕВЩ + Ni/CaO та ПЕВЩ + Ni/MgO демонструють високий вихід рідини (рис. 2, 3).

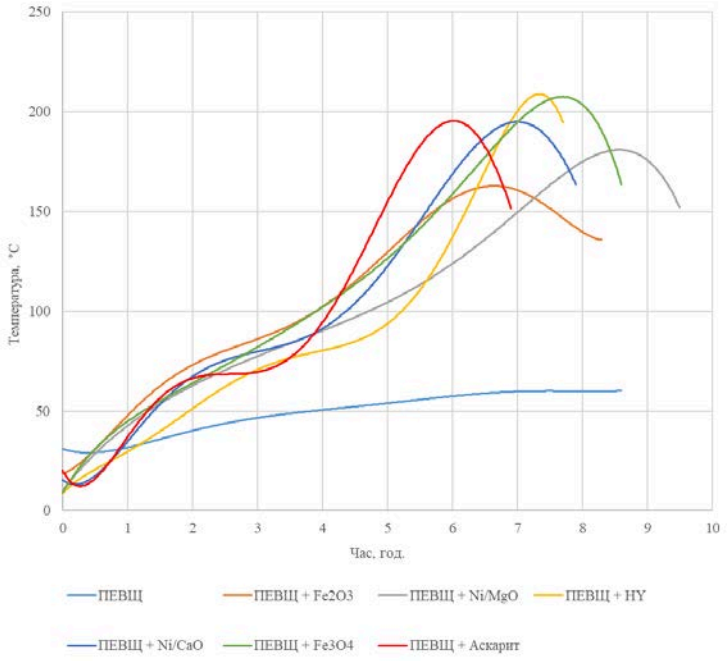


Рис. 2. *Залежність температури пари від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів*

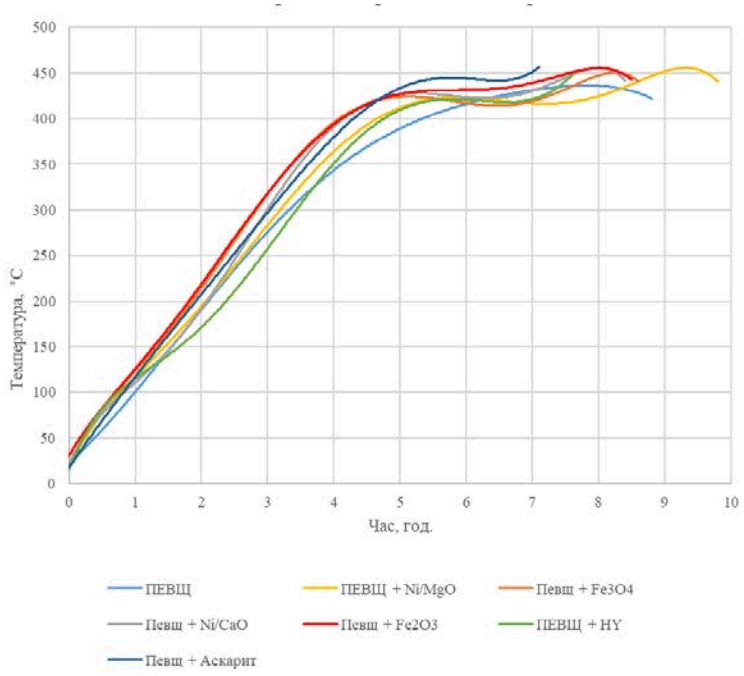


***Рис. 3**. Залежність температури реактора від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів*

Коли температура реактора досягає 350–450 °С, починається руйнування полімерного ланцюга ПЕВЩ – розрив хімічних зв'язків С–С у полімерному ланцюзі та розпад на низькомолекулярні фрагменти, переважно на алкани, алкени та ароматичні сполуки. Відбувається утворення вільних радикалів – активних частинок, які можуть вступати в подальші реакції.

При досягнені температури 500–600 °С відбувається дегідрогенізація – видалення водню з органічних залишків, особливо цей процес прискорюється за допомогою використання металевих каталізаторів, формування стабільних циклічних структур і в кінцевому результаті - утворення твердого пірокарбону. Каталізатори Fe_3O_4, Fe_2O_3 сприяють утворенню організованих вуглецевих наноструктур (нанотрубок, нанофібрил). Отриманий пірокарбон має високий вміст вуглецю (>80 %), пористу структуру, високу термічну та хімічну стійкість, електропровідність.

Каталітичний піроліз поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) є перспективним методом переробки, що дозволяє ефективно перетворювати його на рідкі та газоподібні вуглеводні, а також утворювати пірокарбон з високим вмістом вуглецю. Використання каталізаторів сприяє зниженню температури процесу, підвищенню виходу рідких продуктів і формуванню організованих вуглецевих наноструктур. Аналіз механізмів термічного розкладу ПЕВЩ підтверджує, що контрольоване розщеплення полімерного ланцюга знижує кількість небажаних побічних речовин і дозволяє отримувати цінні вторинні продукти [4, 5]. Таким чином, каталітичний піроліз може бути ефективним способом переробки пластикових відходів, зменшуючи їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Література

1. Shahina Riaz, Nabeel Ahmad, Wasif Farooq, Imtiaz Ali, Mohd Sajid, Muhammad Naseem Akhtar, «Catalytic Pyrolysis of Hdpe for Enhanced Hydrocarbon Yield: A Boosted Regression Tree Assisted Kinetics Study for Effective Recycling of Waste Plastic», 39 p, 25 Jun 2024. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4875481

2. Katok K. V., Tertykh V. A., Pavlenko A. M., Brychka S. Ya., Prykhodko G. P., «Pyrolytic synthesis of carbon nanostructures on Ni, Co / MCM-41 catalysts» // Magisterium. Natural Sciences. 2004. Issue. 16.

3. Lu Yao, Jianhua Zhu, Shuyuan Li, Yue Ma, Changtao Yue , "Analysis of liquid products and mechanism of thermal/catalytic pyrolysis of HDPE", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 11 November 2022. https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11745-2

4. Sittichai Natesakhawat, Jennifer Weidman, Stephanie Garcia, Nicholas C. Means, Ping Wang «Pyrolysis of high-density polyethylene: Degradation behaviors, kinetics, and product characteristics», Journal of the Energy Institute, Volume 116, October 2024, 101738, 5 July 2024. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967124002162

5. Enggar Hero Istoto, Widayat and Singgih Saptadi, «Production of Fuels From HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods», E3S Web Conf., Volume 125, 2019, The 4th International Conference on Energy, Environment, Epidemiology and Information System (ICENIS 2019), Article Number 14011, 4 p, Section Renewable Energy. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/51/e3sconf_icenis2019_14011/e3sconf_icenis2019_14011.html

CATALYTIC PYROLYSIS OF WASTE POLYMER MATERIALS

Olena IVANENKO
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6838-5400

Bohdan KORINENKO
V.P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry, Ukraine
1 Akademika Kukharia St., Kyiv, 02000, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-7581-5656

Igor BYCHKO
L. V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry, Ukraine
31 Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4164-3024

Karolina VOJTENKO
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0008-5873-8573

Artem MARTYNIUK
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-0822-2092

Abstract

The feasibility of processing polymer waste, in particular high-pressure polyethylene (HDPE), by catalytic pyrolysis in order to obtain alternative energy sources: synthetic oil, pyrolysis gases and pyrocarbon has been demonstrated and substantiated. The thermal destruction of HDPE waste in a batch plant in the absence of atmospheric oxygen with and without the use of catalysts (Ni/MgO, Fe_2O_3, Ni/CaO, Fe_3O_4, HY, Ascarit) has been investigated. It was found that catalytic pyrolysis in the temperature range of 450°C contributes to an increase in the yield of liquid hydrocarbons, in particular synthetic oil, as well as to an improvement in the qualitative composition of the obtained fractions. It was determined that the use of catalysts contributes to a decrease in the content of the solid residue and an increase in the yield of the gas mixture.

Keywords: high-density polyethylene, pyrolysis, catalysts, pyrolysis liquid, pyrocarbon.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330389

ВИКОРИСТАННЯ ПОРТАТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ НА ПРИКЛАДІ КРИНИЧНОЇ ВОДИ ШОСТКИНСЬКОЇ ГРОМАДИ

Софія ІГНАТЕНКО[1], Інна ГУТАК[1], Оксана ПАВЛЕНКО[2]
[1]*Шосткинський НВК:спеціалізована школа І-ІІ ступенів - ліцей Шосткинської міської ради Сумської області*
вул. Свободи, 33, 41100 Шостка, Україна
[2]*Шостинський інституту Сумського Державного Університету*
вул. Леоніда Каденюка, 1, 41100 Шостка, Україна
e-mail: ignatenko@shostka-licey.com

Анотація

Роботу присвячено дослідженню ефективності використання портативних фільтрів «Silver Aqua» від американського благодійного фонду для очищення питної води. Зразки води відібрані з криниць Шосткинської територіальної громади. Проведено аналіз зразків підземних вод до та після їх очищення з використанням портативних фільтрів. Було проаналізовано вміст таких поширених забруднюючих речовин як нітрати та кишкова паличка. Відомо, що останнім часом якість підземних вод суттєво знизилася через потрапляння у ґрунти продуктів руйнування агропромислових та хімічних підприємств внаслідок бойових дій. Зважаючи на це використання портативних фільтрів мешканцями громад та особливо військовими може запобігти отруєнням, інфекціям та хронічним захворюванням.

В якості методів аналізу використані фотоколориметричний метод визначення нітратів з саліциловокислим натрієм та експрес-метод визначення кишкової палички. За результатами досліджень підтверджено ефективність використання портативних фільтрів стосовно цієї групи забруднювачів.

Ключові слова: *підземні води, забруднення, нітрати, кишкова паличка, портативні фільтри, саліцилатний метод, forpeace.*

Нестача питної води є однією з великих проблем під час війни. Через збільшення забруднень навколишнього середовища використання води з наземних та підземних джерел часто стає неприйнятним і для військових і для цивільного населення в зоні бойових дій [1]. Використання якісних портативних фільтрів може стати рішенням цієї проблеми.

Метою роботи було дослідити роботу портативних фільтрів «Silver Aqua» на прикладі очищення забрудненої води з колодязів Шосткинської територіальної громади.

Для аналізу було обрано такі поширені забруднювачі, як нітрати та кишкова паличка.

Нітрати потрапляють у воду переважно внаслідок використання мінеральних добрив, витоку стічних вод і розкладу органічних речовин. На теперішній час внаслідок руйнування

складів з добривами та промислових підприємств, рівень забруднення значно збільшився. Надлишок нітратів у воді призводить до збільшення вірогідності онкологічних захворювань, можливі порушення функції щитоподібної залози, імунної та репродуктивної систем [2-5].

Кишкова паличка зазвичай потрапляє у воду внаслідок фекального забруднення – від домашніх або диких тварин, каналізаційних витоків, або недосконалих систем очищення. Руйнування міської інфраструктури також призводить до збільшення рівня забруднення. Ця бактерія викликає діарею, блювоту, біль у животі, іноді — зневоднення, яке особливо небезпечне у польових умовах. Деякі штами E. coli можуть призводити до гемолітико-уремічного синдрому, що уражає нирки й загрожує життю [6-7].

Актуальність роботи обумовлена необхідністю знаходження зручного та ефективного методу очищення води в польових умовах для застосування українськими військовими та мешканцями громад вздовж лінії бойового зіткнення.

Безперечно, існує багато інших способів очищення води, проте з огляду на складну екологічну ситуацію та зважаючи на умови проживання військових на лінії фронту, основними критеріями для відбору методів знезараження є практичність та ефективність. Надані фільтри, безумовно, є зручними у використанні, ще одна перевага - їх невеликі розміри. Задачею дослідження було визначити їх ефективність.

Об'єкти дослідження: зразки підземних вод з криниць Шосткинської територіальної громади та портативні фільтри «Silver Aqua», надані представниками американського благодійного фонда ForPEACE.

Предмет дослідження: ефективність роботи наданих фільтрів для очищення та знезараження зразків підземних вод.

Практичне застосування: надані фільтри можна використовувати для очищення поверхневих та підземних вод в польових умовах від шкідливих домішок.

Для аналізу були відібрані зразки води з криниць Шосткинської територіальної громади згідно правилам відбору проб [8]. Об'єм проби води для проведення аналізів становив 500 мл.

Портативні фільтри для дослідження надані представниками американського благодійного фонда ForPEACE [9]. Проєкт допомоги Україні forPEACE займається гіперлокалізованою адресною допомогою. В рамках проєкту «Чиста вода» американського благодійного фонду ForPEACE надаються системи очищення води для організацій, комунальних господарств, які потерпають від нестачі чистої води. Також представники фонду надавали індивідуальні портативні фільтри для використання військовими в зоні бойових дій.

Було проведено хімічних аналіз відібраних проб води на вміст нітратів та кишкової палички. В якості методу аналізу обрано стандартний метод визначення нітратів фотометричним методом з саліцилатом натрію з побудовою градуювального графіку [10]. Оптичну густину кольорових розчинів вимірювали за допомогою електрофотоколориметра UNICO 2100, використовуючи фіолетовий світлофільтр з довжиною хвилі 410 нм і кювети з товщиною робочого шару 1,009 см. З метою усунення впливу йонів Феруму використовувався розчин калію-натрію виннокислого. У якості розчину порівняння використано розчин з концентрацією нітратів 0,0 мг/дм^3, послідовно оброблений всіма реагентами.

Для визначення кількості кишкової палички зі зразків криничної води було відібрано 4 проби, в яких, згідно попередньо отриманим даним від Шосткинського районного відділу ДУ «Сумський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», було виявлено найбільшу кількість кишкової палички.

Для виявлення кишкової палички у воді використовувався набір для експрес-тесту води на E.COLI компанії «AGUAVIAL». Всі дії щодо експерименту виконувалися згідно інструкцій тесту.

Після визначення початкового вмісту забруднювачів проби води очищувалися з використанням портативних фільтрів «Silver Aqua». Послідовність дій виконувалася згідно інструкції на фільтрі. За інструкцією потрібно налити воду у пляшку із зануреним в неї фільтрувальним приладом, щільно закрити пляшку та інтенсивно струшувати протягом 30 секунд. Таким чином були оброблені всі відібрані зразки.

Рис. 1. *Портативні фільтри для очищення води в польових умовах*

Після очищення води був повторно проведений аналіз вмісту нітратів та кишкової палички у зразках. Результати вимірювань вмісту нітратів у досліджуваних зразках води до та після очищення представлені на рис. 2.

Можна зробити висновок, що після очищення води портативними фільтрами протягом 30 секунд концентрація нітратів суттєво зменшилася.

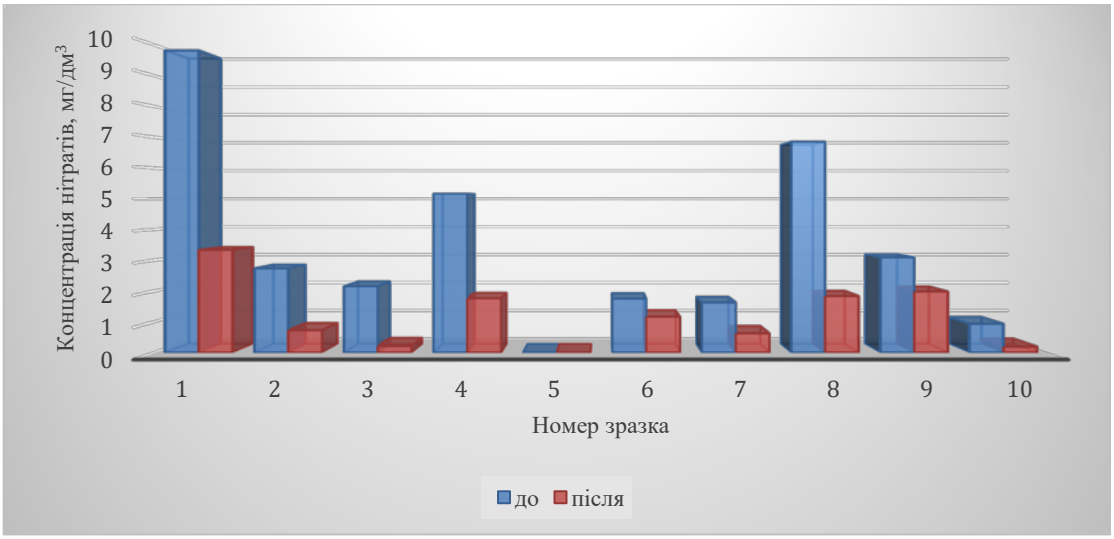


Рис. 2. *Різниця концентрації нітратів у зразках до та після очищення*

На рисунку можна побачити значну залежність ступеню вилучення нітратів від початкової концентрації, що характерно для розведених розчинів. Зогляду на іонну будову забруднюючої речовини, а саме – негативно заряджені нітрат-іони, можна зробити припущення, що поверхня сорбенту містить поляризовані або іонні позитивно зарядженні частки.

Адсорбція іонів має чітко виражений вибірковий характер. Тверда поверхня переважно адсорбує ті з іонів, які мають з поверхнею загальне атомне угрупування. Адсорбція іонів залежить від їх радіусу. При однаковому заряді максимальну адсорбційну спроможність мають іони найбільшого радіусу [11]. Нітрат-іони є одними з найбільших неорганічних іонів, тому зважаючи на їх активну сорбцію можна зробити висновок, що поверхня сорбенту в портативних фільтрах складається з полярних молекул або іонів. Процес аналізу води на вміст кишкової палички наведений на рисунках 3-6.

Рис. 3. *Зразки води №1*

Рис. 4*.Зразки води №2*

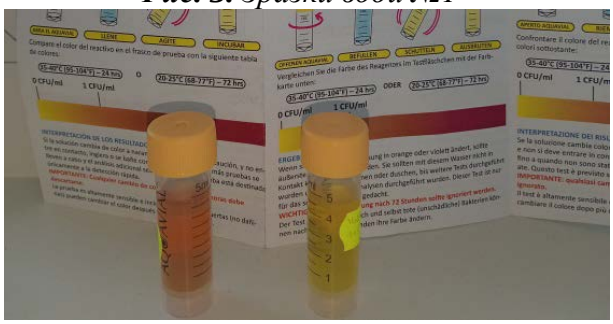


Рис. 5. *Зразки води №3*

Рис. 6. *Зразки води №4*

На жаль надані експрес-тести не дають можливості визначити кількісний вміст кишкової палички у воді, лише її наявність у кількості більше або менше 1 cfu/ml (колонієутворюючої одиниці на см^3). Результати аналізу зразків води на кишкову паличку до та після очищення представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати експрес тестів

№	Кишкова паличка в неочищеній воді	Кишкова паличка в очищеній воді
1	+	-
2	+	-
3	+	-
4	-	-

Отже за наведеними результатами дослідження проб води на вміст кишкової палички, можна зробити висновок, що використання портативних фільтрів «Silver Aqua» є ефективним щодо очищення води від кишкової палички. У всіх випадках зараження води кишковою

паличкою після використання фільтрів вміст кишкової палички значно знизився. Якщо вірне припущення про йонну будову сорбенту, що міститься в портативних фільтрах, то одним з таких іонів може бути позитивно заряджений іон срібла, який позначений у назві фільтру. Саме він може й обумовлювати руйнування кишкової палички в процесі очищення води.

Таким чином в ході роботи було досліджено ефективність очищення питної води портативними фільтрами в польових умовах щодо таких забруднювачів, як нітрати та кишкова паличка. За результатами проведеної роботи було обґрунтовано можливість використання таких фільтрів для очищення води з поверхневих та підземних джерел як військовими в умовах бойових дій так і цивільним населенням в зоні бойового зіткнення.Можливі подальші дослідження якості очищення щодо інших поширених забруднювачів води. Аналіз зразків води після очищення свідчить про перспективність розвитку цього напряму з метою виготовлення портативних фільтрів власними підприємствами України у необхідній кількості та їх використання для очищення води у польових умовах.

Література

1. Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. (2024). 2024 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu.
2. Іваненко Л. Д. Вплив нітратів на організм людини. Педагогічна Житомирщина. 2005. №2. С. 73-76.
3. Данчишин, М. В. (2023). Оцінка впливу нітратів на здоров'я населення при надходженні з питної води. Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України, (2), 27–33.
4. Авраменко Л. М., Туряниця С. М. Оцінка ризику споживання питної води з підвищеним вмістом нітратів для здоров'я населення. – Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини: збірка матеріалів науково-практичної конференції з міжнародною участю, 2023.
5. Кравченко, М., & Василенко, Л. (2022). Проблема забруднення питної води нітрат-іонами та сучасні методи її вирішення. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, (41), 42–51.
6. Водна мікробіологія: Методичні вказівки для студентів екологічного факультету, зі спеціальності 207 Водні біоресурси та аквакультура / Рубленко І.О. – Біла Церква – 2022– 21 с.
7. Липовська, В.В. Біологічні особливості ентеропатогенної кишкової палички / В.В. Липовська // Сучасні проблеми клінічної та теоретичної медицини : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції студентів, молодих вчених, лікарів та викладачів 20 - 22 квітня 2005 року. — Суми : СумДУ, 2005. — С. 14-15.
8. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: ДСанПіН 2.2.4-171-10 з змінами, внесеними згідно з наказом Міністерства охорони здоров'я України від 15.08.2011 р. № 505. – 2011.
9. ForPEACE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://forpeace.us/ (дата звернення: 25.10.2025). – Назва з екрана.
10. ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості». Видання офіційне. – К., 2014. - 25 с.
11. Запольський А.К. , Водопостачання, водовідведення та якість води: підручник/ Київ «Вища школа» 2005.

USE OF PORTABLE FILTERS FOR PURIFICATION OF DRINKING WATER USING THE EXAMPLE OF SPRING WATER IN THE SHOSTKY COMMUNITY

Sofia IGNATENKO
Shostka NVK: specialized school of I-II levels – lyceum
Svobody St., 33, 41100 Shostka, Ukraine

Inna HUTAK
Shostka NVK: specialized school of I-II levels – lyceum
Svobody St., 33, 41100 Shostka, Ukraine

Oksana PAVLENKO
Shostka Institute, Sumy State University
Leonida Kadeniuka St., 1, 41100 Shostka, Ukraine
https://orcid.org/0009-0005-5568-2832

Abstract

The study examines the effectiveness of portable "Silver Aqua" filters supplied by a U.S. charitable foundation for drinking-water purification. Water samples were taken from wells within the Shostka territorial community. Analyses of groundwater were carried out before and after treatment with the portable filters. The concentrations of common contaminants—nitrates and Escherichia coli (E. coli)—were assessed. It is known that in recent times groundwater quality has deteriorated significantly due to the entry into soils of by-products from the destruction of agro-industrial and chemical facilities as a result of hostilities. In this context, the use of portable filters by community residents and especially by military personnel can help prevent poisoning, infections, and chronic diseases.

As analytical methods, we employed the photocolorimetric determination of nitrates using sodium salicylate and a rapid test for E. coli. The results confirm the effectiveness of the portable filters with respect to this group of contaminants.

Keywords: groundwater, contamination, nitrates, Escherichia coli, portable filters, salicylate method, forpeace.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329571

HYDROMETALLURGICAL METAL EXTRACTION FROM PCBS

Gvidas JOKUBAUSKAS, Egidijus GRIŠKONIS,
Remigijus IVANAUSKAS, Gintaras DENAFAS
Kaunas University of Technology
Radvilėnų pl. 19, LT-50254, Kaunas, Lithuania
e-mail: ctf@ktu.lt

Abstract

There are many valuable metals hidden inside printed circuit boards (PCBs for short), such as copper, aluminum, lead, iron, tin, and even noble metals like gold, silver, and platinum. To be exact, approximately 49% of all metals in PCBs are copper, 21.8% zinc, 11.6% iron, 6.5% nickel, 5.5% aluminum, 1.9% lead, 1.7% tin, 1.5% silver, 0.5% chromium, 0.1% gold, and less than 0.1% palladium. As technology advances rapidly, old devices are being discarded, yet only about 17.4% of all electronic waste was officially recycled in 2019 [1]. This leads us to believe that roughly 82.6% of all electronic waste was left untreated. This also includes PCBs, which (depending on the production year and manufacturer) can contain approximately 340 g of gold, 3.5 kg of silver, 140 g of palladium, and 130 kg of copper per ton of PCBs [2]. These numbers quickly add up, and many of the lost metals can heavily pollute the environment — including soil and water — if not properly treated. One of the ways to treat and extract these metals is by using hydrometallurgy (metal extraction using aqueous solutions) [3]. It is still widely used to extract various metals, either selectively or broadly. The entire process consists of three main stages: selective leaching, solution purification, and recovery of specific elements (usually via precipitation). In this study, we focus on extracting metals from waste using different acids and reagents. We decided to test traditional methods (such as Aqua Regia and Piranha Solution) and compare them to less commonly used alternatives (such as thiosulfate and salt solutions). Aqua Regia usually consists of 3 parts concentrated HCl and 1 part concentrated HNO_3. It is capable of dissolving noble metals like gold and silver. Piranha solution consists of 3 parts concentrated H_2SO_4 and 1 part H_2O_2. Other less common methods used in this work include: Salt solution, consisting of 10 parts saturated NaCl solution, 1 part concentrated HCl, and 2 parts concentrated H_2O_2.

Key words: *hydrometallurgy, PCB, noble metal extraction, metal extraction, aqua regia, salt solution, electronical waste treatment.*

We have decided to use old mobile phone shredded PCB's and 4 different reaction types: Aqua Regia with 0.09 – 0.18 mm fraction, and other 5 reactions with 0.72 – 1.6 mm fraction (Aqua Regia, Piranha solution, Salt solution). Also, we were changing the circumstances of the reactions: different time intervals (10, 30, 60, 120 minutes), different temperature intervals (50 ^{0}C and 70 ^{0}C) and ultrasonic sound usage to test, whether that will improve or decrease the extraction. The solutions then diluted, filtrated and ICP tests were conducted. For every reaction we took approximately 2.00g

of PCB's 1 reaction was hold 10 min at room temperature, 2 reaction 30 min at room temperature, 3 reaction 60 min at r.t. and 4 reaction 120 min r.t., 5 reaction was conducted at 50 ^{0}C for 60 min , 6 reaction was conducted at 70 ^{0}C for 60 min. 7 reaction was conducted at room temperature, 60 mins with bigger volume of reagents (twice as big), 8 reaction was conducted at 60 ^{0}C, 60 mins with ultrasonic sound with bigger volume of reagents (twice as big) and 9 reaction was conducted at 60 ^{0}C without ultrasonic sound with bigger volume of reagents (twice as big). Based form figure 1, the copper extraction was better at higher temperatures, although the longer we held the solution, the bigger the tin concentration was. The ultrasonic sound, again, seemed to not improve extraction. The silver was barely present in the results, since it sedimented as AgCl.

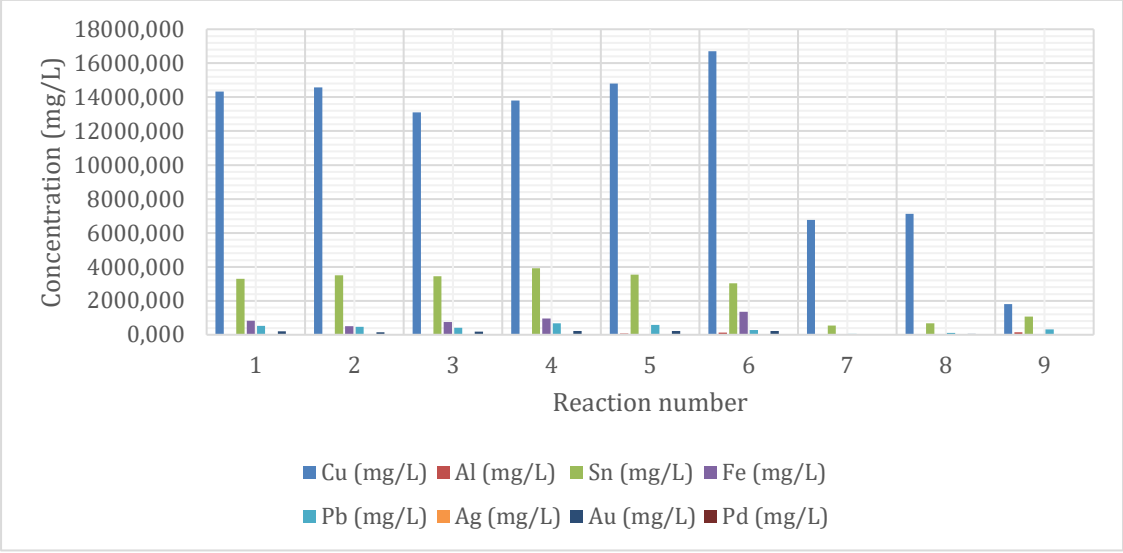


Fig. 1. *Aqua Regia reaction results with 0.72 – 1.6 mm fraction PCB's*

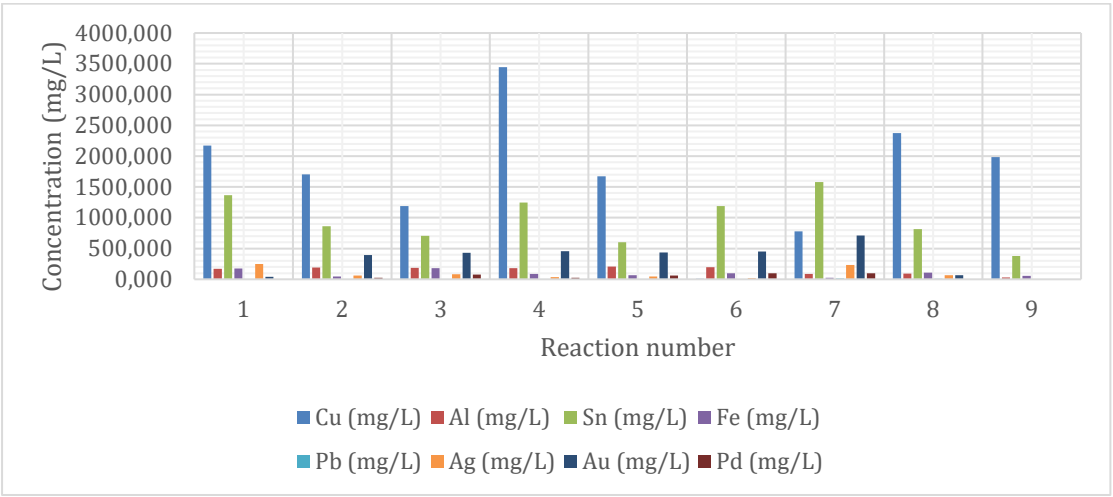


Fig. 2*. Piranha solution results with 0.72 – 1.6 mm fraction PCB's*

Using the Piranha solution, it was visible, that the solution started dissolving organic material, since thick "goo" got stuck on glassware during the reaction. However, Piranha solution got better gold leaching results than Aqua Regia, based on these results. Here we can also monitor, that extending reaction time doesn't add big significance. However this time, we got some better results using ultrasonic sound.

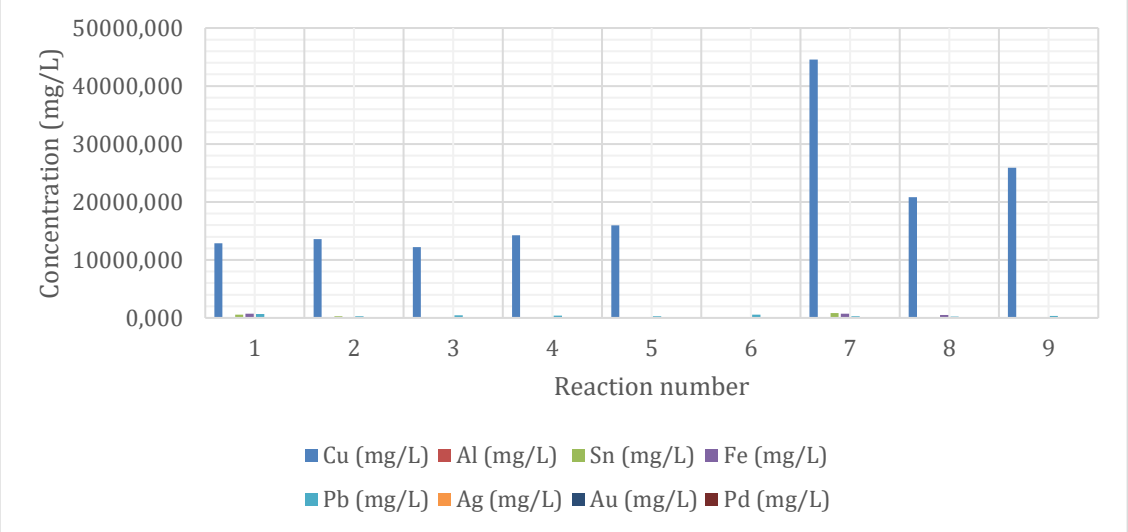


Fig. 3. *Salty solution results with 0.72 – 1.6 mm fraction PCB's*

Based on figure 3, we can see, that the copper concentration was increased heavily, this time, ultrasound usage was effective, but not as effective as just increasing volume of reagents. For better other element insight, theres figure 5, providing better view of other elements.

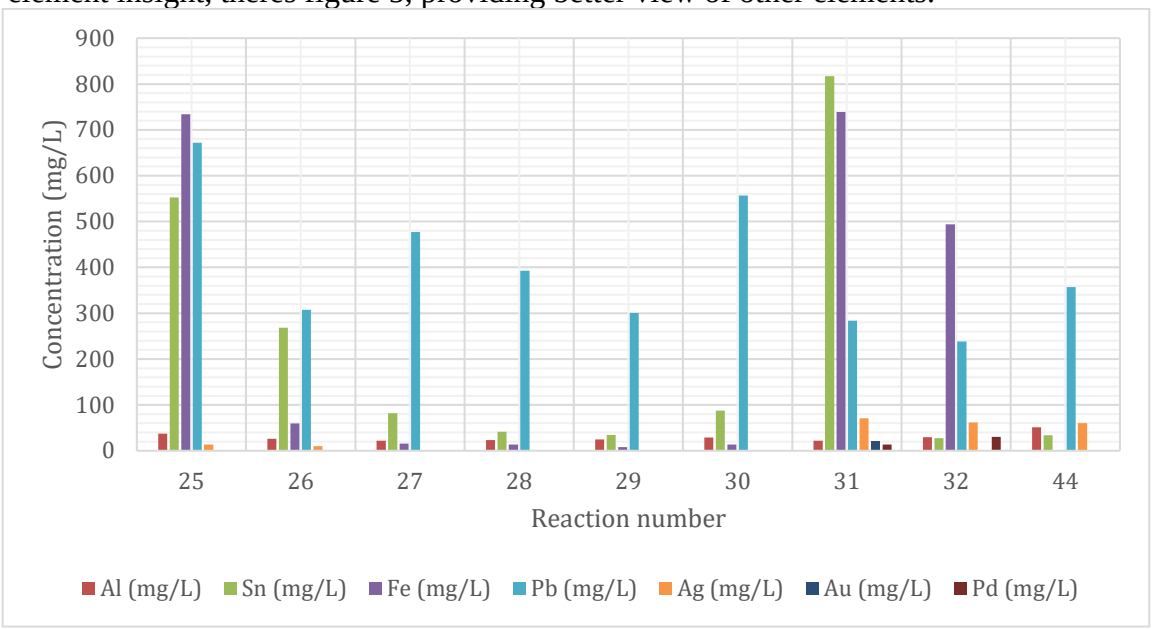


Fig. 4. *Salty solution results with 0.72 – 1.6 fraction PCB's (without Cu)*

Based on figure 4, we can see, that heat only improved lead extraction by a little bit. The solutions got cloudy, which could indicate, that some elements created non soluble salts. Our guess would be that most of the gold and silver are there (Although with the help of ultrasonic sound we managed to get some fractions of silver in the solution).

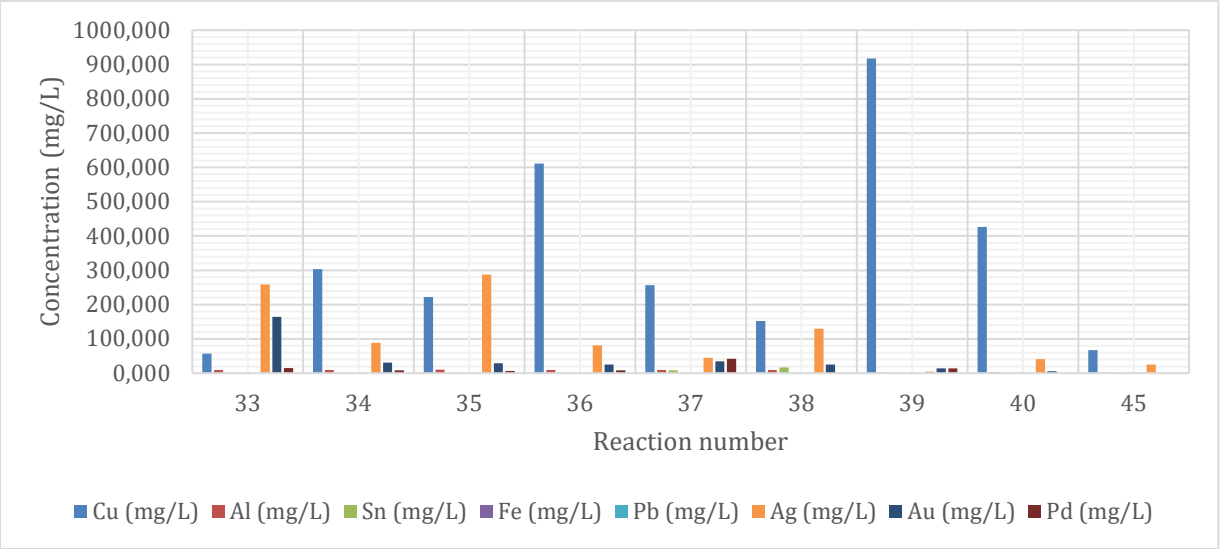


Fig. 5. *Thiosulphate reaction results with 0.72 – 1.6 mm fraction PCB's*

As seen in Figure 5, silver concentration is the biggest amongst all the other reractions above. However, other metal concentrations are low or even non existant, which means that thiosulphate could be used exclusively for silver leaching.

Recomendations for further studies about these reactions would be: find out more about the sediments, that occur during the salty solution reaction (what do they consist out of) as well as study, how to retrieve the metals after leaching them (either chemically or physicaly).

References

1. Prashant Ram Jadhao, Ejaz Ahmad, K.K. Pant, K.D.P. Nigam, Environmentally friendly approach for the recovery of metallic fraction from waste printed circuit boards using pyrolysis and ultrasonication, Waste Management, Volume 118, 2020, Pages 150-160, ISSN 0956-053X, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.028

2. M.C. Vats, S.K. Singh, Assessment of gold and silver in assorted mobile phone printed circuit boards (PCBs): Original article, Waste Management, Volume 45, 2015, Pages 280-288, ISSN 0956-053X, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.002

3. M.C. Vats, S.K. Singh, Assessment of gold and silver in assorted mobile phone printed circuit boards (PCBs): Original article, Waste Management, Volume 45, 2015, Pages 280-288, ISSN 0956-053X, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.002

4. 10. Copyright, Editor(s): Michael Nicol, Hydrometallurgy, Elsevier, Volume 1, (2022a), ISBN 9780323993227, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99322-7.12001-0

5. 11. Copyright, Editor(s): Michael Nicol, Nicholas Welham, Gamini Senanayake, Hydrometallurgy, Elsevier, Volume 2 (2022b), ISBN 9780323992145, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99214-5.12001-7

ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНЕ ВИДОБУВАННЯ МЕТАЛІВ З ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

Гвідас ЙОКУБАУСКАС
Каунаський технічний університет, Литва
Radvilėnų pl. 19, LT-50254, Kaunas, Литва

Егідіюс ГРІШКОНІС
Каунаський технічний університет, Литва
Radvilėnų pl. 19, LT-50254, Kaunas, Литва
https://orcid.org/0000-0002-3426-6857

Ремігіюс ІВАНАУСКАС
Каунаський технічний університет, Литва
Radvilėnų pl. 19, LT-50254, Kaunas, Литва
https://orcid.org/0000-0002-2982-8931

Гінтарас ДЕНАФАС
Каунаський технічний університет, Литва
Radvilėnų pl. 19, LT-50254, Kaunas, Литва
https://orcid.org/0000-0002-6834-1026

Анотація

Усередині друкованих плат (скорочено PCB) приховано багато цінних металів, таких як мідь, алюміній, свинець, залізо, олово, а також дорогоцінні метали — золото, срібло та платина. Якщо бути точними, приблизно 49% усіх металів у друкованих платах становить мідь, 21,8% — цинк, 11,6% — залізо, 6,5% — нікель, 5,5% — алюміній, 1,9% — свинець, 1,7% — олово, 1,5% — срібло, 0,5% — хром, 0,1% — золото, і менше ніж 0,1% — паладій. Зі стрімким розвитком технологій старі пристрої масово виводяться з експлуатації, однак лише близько 17,4% усіх електронних відходів було офіційно перероблено (дані 2019 р.) Це дає підстави припускати, що приблизно 82,6% електронних відходів залишаються необробленими. До них належать і друковані плати, що, залежно від року виробництва та виробника, можуть містити приблизно 340 г золота, 3,5 кг срібла, 140 г паладію та 130 кг міді на одну тонну сировини. Такі кількості швидко накопичуються, і у випадку відсутності належної утилізації плат, деякі із вказаних металів можуть серйозно забруднювати довкілля — зокрема ґрунт і воду. Одним зі способів вилучення цих металів є гідрометалургія (тобто вилучення металів за допомогою водних розчинів). Цей метод досі широко використовується для видобування різноманітних металів — як вибірково, так і комплексно. Увесь процес включає три основні етапи: селективне вилуговування, очищення розчину та осадження окремих елементів (як правило, шляхом осадження). У цьому дослідженні ми зосереджуємось на вилученні металів із відходів за допомогою різних кислот і реагентів. Ми вирішили протестувати традиційні методи (такі як «царська водка» та «розчин Піранья») та порівняти їх із менш поширеними альтернативами (такими як тіосульфат та сольові розчини). Царська водка зазвичай складається з 3 частин концентрованої HCl та 1 частини концентрованої HNO_3. Вона здатна розчиняти дорогоцінні метали, зокрема золото та срібло. Розчин Піранья складається з 3 частин концентрованої H_2SO_4 та 1 частини H_2O_2. Інші, менш поширені методи, використані в цьому дослідженні, включають сольовий розчин, що складається з 10 частин насиченого розчину NaCl, 1 частини концентрованої HCl та 2 частин концентрованої H_2O_2.

Ключові слова: гідрометалургія, друкована плата, видобування благородних металів, видобування металів, царська водка, сольовий розчин, переробка електронних відходів.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330501

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATIONAL PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF REVERSE OSMOSIS SYSTEMS

Rostyslav KARPENKO, Mykola GOMELYA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Beresteyskyi Avenue, 03056 Kyiv, Ukraine
e-mail: r.karpenko@kpi.ua

Abstract

This paper addresses the pressing issue of water quality assurance under increasing anthropogenic pressure. The efficiency of reverse osmosis (RO) technology for water purification, particularly in the pharmaceutical industry, is analyzed. Data concerning the impact of key operational parameters (pressure, recovery rate) and physico-chemical characteristics of feedwater (pH, hardness, alkalinity) on membrane purification efficiency are systematized. Particular attention is given to the problems of membrane scaling, especially in regions with high concentrations of hardness salts. Methods for assessing water's scaling tendency (LSI, SDI indices), monitoring strategies, and water pre-conditioning, including antiscalant dosing (phosphonates, polyacrylic acid) and pH adjustment, are examined. Modern approaches to optimizing RO systems, such as the use of digital twins and hybrid technologies (RO-UV, RO-ED), which contribute to improved purification quality, energy efficiency, and reduced fouling risks, are also highlighted. Recommendations are proposed for optimizing operational parameters, developing water stability assessment methodologies, and implementing monitoring systems to ensure the long-term efficiency of reverse osmosis systems.

Key words: *reverse osmosis, water purification, membrane fouling, scaling, lsi index, sdi index, antiscalants, operational parameters, water quality monitoring.*

In modern conditions, water pollution and the preservation of its quality are becoming particularly relevant. Anthropogenic impact, industrialization, and climate change are deteriorating the quality of natural water supply sources, necessitating the implementation of effective purification technologies. This is especially important in industries with high water quality requirements, particularly in pharmaceuticals, where it is used as a raw material, solvent, and for equipment washing.

One of the most effective technologies is reverse osmosis (RO), which ensures over 99% removal of impurities, including hardness salts and heavy metals [1]. However, the efficiency of RO systems largely depends on the quality of the feed water. Parameters such as pH, alkalinity, hardness, temperature, and recovery rate affect membrane fouling, reducing productivity, selectivity, and membrane lifespan [2].

Particular attention is required for the purification of low-mineralized, industrial, and drinking waters in regions with elevated concentrations of hardness salts (Ca^{2+}, Mg^{2+}), high alkalinity, and pH.

Such conditions are characteristic of the southern and eastern regions of Ukraine and cause scaling, which reduces filtration efficiency and requires frequent system maintenance [2].

The aim of this work is to systematize data on the influence of pressure, recovery rate, and physico-chemical characteristics of water on the efficiency of membrane purification, with an emphasis on water softening, minimization of scaling, and ensuring the stable operation of RO systems.

High water hardness contributes to the formation of sediments on membrane surfaces, especially at high recovery rates. Concentration polarization is the primary prerequisite for scaling, which intensifies with increasing pressure [3].

The LSI (Langelier Saturation Index) and SDI (Silt Density Index) are commonly used to evaluate the scaling potential of water. A positive LSI value indicates water instability relative to carbonate sediments. SDI evaluates the presence of colloidal and suspended particles. Both indices are important during both the design and operation of systems [4].

Monitoring water characteristics at various stages (feed water, permeate, concentrate) allows for the timely detection of fouling. Important parameters are: pH, electrical conductivity, turbidity, TDS (Total Dissolved Solids), and ions such as Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, SiO_2 [5]. Automated analyzers provide continuous control and signal deviations [6].

Pre-conditioning includes dosing antiscalants, pH correction, and the use of ion-exchange softening. Reducing pH to 6,0 – 6,5 (e.g., with sulfuric acid) decreases the risk of carbonate scaling [7].

Antiscalants such as phosphonates (e.g., ATMP) and polymeric inhibitors (based on polyacrylic acid, PAA) effectively inhibit the crystallization of calcium salts [8, 9]. Phosphonates alter crystal morphology, and high molecular weight PAA better suppresses crystallization, although lighter fractions may cause biofouling.

Modern strategies for optimizing reverse osmosis (RO) systems increasingly include the application of digital models ("digital twins"), predictive algorithms, and hybrid technologies, such as combining RO with ultraviolet (UV) disinfection or electrodialysis (ED). These approaches improve the quality of water treatment, increase the energy efficiency of systems and reduce the risks of fouling.

The use of digital twins, which combine real sensor data with virtual system models, allows us to predict membrane behavior, optimize operating modes, and reduce maintenance costs. For example, at the desalination plant in Carlsbad (USA), the implementation of a digital twin resulted in a reduction of membrane maintenance costs by nearly $1,5 million over five years [10]. Furthermore, hybrid systems that integrate RO with other technologies demonstrate high efficiency in complex water treatment conditions. Studies have shown that such combinations allow for achieving a high degree of purification with reduced energy consumption and less concentrate formation [11].

Recommendations and prospects

1. Optimization of operational parameters: Further research is needed to determine optimal operating modes for RO systems under various feed water characteristics, particularly concerning pressure and recovery rate.
2. Development of water stability assessment methodologies: Implementing standard protocols that combine LSI, SDI, and other indicators will allow for more accurate prediction of scale formation and the adoption of appropriate measures.
3. Study of water softening efficiency: Comparative studies on the impact of different water softening methods, including ion-exchange and membrane technologies, will help determine the most effective strategies for specific conditions.

4. Implementation of monitoring and control systems: The use of modern technologies, such as digital models and real-time monitoring systems, will contribute to increasing the efficiency and reliability of water purification systems.

Conclusions

The operational efficiency of reverse osmosis systems largely depends on the quality of the feed water and operational parameters. High hardness, pH, and other characteristics can lead to scale formation and reduced system productivity. The application of LSI, SDI, and other methods for assessing water stability, as well as the implementation of modern monitoring and control technologies, allows us to optimize the operation of water purification systems and ensure their long-term effectiveness.

References

1. Kimani, E. M.; Pranić, M.; Porada, S.; Kemperman, A. J. B.; Ryzhkov, I. I.; van der Meer, W. G. J.; Biesheuvel, P. M. The influence of feedwater pH on membrane charge ionization and ion rejection by reverse osmosis: An experimental and theoretical study. *Journal of Membrane Science* **2022**, *660*, 120800. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120800

2. Radovenchyk, I.; Homelia, M.; Vakulenko, A.; Shabliy, T. Determining the Efficiency of Reverse Osmosis in the Purification of Water from Phosphates. *Journal of Ecological Engineering* **2023**, *24*, 238–246. https://doi.org/10.12911/22998993/157023

3. Ahmed, M.A.; Amin, S.; Mohamed, A.A. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon* **2023**, *9*(4), e14908. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14908

4. DuPont Water Solutions. (n.d.). *FilmTec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual*. DuPont. Available online: https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf (accessed on 21 May 2025).

5. Hagglund, C.R.; Duranceau, S.J. Screening the Performance of a Reverse Osmosis Pilot-Scale Process That Treats Blended Feedwater Containing a Nanofiltration Concentrate and Brackish Groundwater. *Membranes* **2024**, *14*(8), 164. https://doi.org/10.3390/membranes14080164

6. Bürkert. Highest Water Quality through Continuous Membrane Monitoring. *Bürkert* n.d. Available online: https://www.burkert.com/en/industries-solutions/solutions/customer-references/highest-water-quality-through-continuous-membrane-monitoring2 (accessed on 21 May 2025).

7. Hydranautics. Chemical Pretreatment for RO and NF. *Technical Application Bulletin No. 111*. **2017**. Available online: https://membranes.com/wp-content/uploads/2017/06/TAB-111.pdf (accessed on 21 May 2025).

8. Kuhn, R.; Vornholt, C.; Preuß, V.; Bryant, I.M.; Martienssen, M. Aminophosphonates in Nanofiltration and Reverse Osmosis Permeates. *Membranes* **2021**, *11*(6), 446. https://doi.org/10.3390/membranes11060446

9. Kaushik, S.A.; Armbruster, D.; Dittmer, J.; Bruniecka-Sulewski, D.; Wendler, B.; Ernst, M. Investigation of scaling inhibition and biofouling potential of different molecular weight fractions of a PAA antiscalant. *npj Clean Water* **2024**, *7*, 36. https://doi.org/10.1038/s41545-024-00332-7

10. Rockwell Automation. Digital Twin Technology Improves Maintenance. *Rockwell Automation* n.d. Available online: https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/case-studies/digital-twin-maintenance.html (accessed on 21 May 2025).

11. Feria-Díaz, J. J.; Correa-Mahecha, F.; López-Méndez, M. C.; Rodríguez-Miranda, J. P.; Barrera-Rojas, J. Recent Desalination Technologies by Hybridization and Integration with Reverse Osmosis: A Review. *Water* **2021**, *13*(10), 1369. https://doi.org/10.3390/w13101369

ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

Ростислав КАРПЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський проспект, 37, м. Київ 03056, Україна,
https://orcid.org/0009-0004-5771-4060

Микола ГОМЕЛЯ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський проспект, 37, м. Київ 03056, Україна,
https://orcid.org/0000-0003-1165-7545

Анотація

У роботі розглядається актуальна проблема забезпечення якості води в умовах зростаючого антропогенного навантаження. Проаналізовано ефективність технології зворотного осмосу (RO) для очищення води. Систематизовано дані щодо впливу ключових експлуатаційних параметрів (тиск, ступінь відбору) та фізико-хімічних характеристик вихідної води (pH, жорсткість, лужність) на ефективність мембранного очищення. Особливу увагу приділено проблемам осадоутворення на мембранах, особливо в регіонах із високим вмістом солей жорсткості. Розглянуто методи оцінки схильності води до осадоутворення (індекси LSI, SDI), стратегії моніторингу та попереднього кондиціювання води, включаючи дозування антискалантів (фосфонати, поліакрилова кислота) та корекцію pH. Висвітлено сучасні підходи до оптимізації систем зворотного осмосу, такі як використання цифрових двійників та гібридних технологій (RO-UV, RO-ED), які сприяють покращенню якості очищення, енергоефективності та зменшенню ризиків забруднення. Запропоновано рекомендації щодо оптимізації експлуатаційних параметрів, розробки методик оцінки стабільності води та впровадження систем моніторингу для забезпечення довгострокової ефективності систем зворотного осмосу.

Ключові слова: зворотний осмос, очищення води, мембранне забруднення, осадоутворення, індекс LSI, індекс SDI, антискаланти, експлуатаційні параметри, моніторинг якості води.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332461

THE IMPACT OF THE DRAINAGE NETWORK ON SURFACE RUNOFF FORMATION IN THE SOMYNE MIRE IN THE CONTEXT OF HYDROLOGICAL REGIME RESTORATION

Vasyl KORBUTIAK[1], Ihor STATNYK[1], Viktar FENCHUK[2] , Yaroslav KHODNEVYCH[3] , Daniel BENATOV[4], Anatolii LISHCHYNSKYI[1]
[1] *National University of Water and Environmental Engineering*
11 Soborna Street, Rivne, 33028, Ukraine
[2] *Frankfurt Zoological Society Office in Ukraine*
4 Tekhnichna Street, Lviv, 79007, Ukraine
[3] *Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine*
13 Chokolivskyi Boulevard, Kyiv, 03186, Ukraine
[4] *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
37 Beresteiskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua

Abstract

In Western Polissia, the peatland complexes of the Rivne Nature Reserve provide vital ecosystem services. However, their hydrological regime has undergone significant alterations due to land reclamation and military-agricultural development. Using the Somyne Mire as a case study, the consequences of drainage have been analysed, including peat degradation, the disappearance of autochthonous communities, increased wildfire risk, and the intensification of drought and flood extremes.

Using Sentinel-1 radar imagery (VH polarisation) from 2019, the impact of the channel network and dam on the distribution of surface runoff in the area surrounding the Somyne Mire has been demonstrated.

With support from the Frankfurt Zoological Society, a hydrological rehabilitation project has been launched, involving the blocking of drainage canals with earthen dams, ongoing monitoring, and adaptive management. The expected outcomes include the restoration of natural moisture and organic matter accumulation processes, increased biodiversity, stabilisation of baseflows in small rivers, and a reduction in flood peaks.

Keywords: *mire, land reclamation, Sentinel-1, hydrological rehabilitation, Somyne, Western Polissia, flood, fire risk.*

In Ukraine, and particularly in Rivne Oblast, the conservation and restoration of wetlands is among the most pressing environmental challenges. One of the key areas in this context is the peatland complexes of the Rivne Nature Reserve. According to the Ramsar Convention, Somyne (along with Syra Pohonya and Perebrody) is designated as a wetland of international importance [1]. These

natural systems (mire complexes) play a crucial role in the environmental network of Western Polissia, preserving unique species of flora and fauna, including rare and endangered plants and animals protected at both national and international levels.

The transformation of the natural Somyne Mire into a system of weirs, canals, and drained areas was originally carried out to support agricultural and military land use.

Despite the initial economic benefits associated with land reclamation infrastructure, recent decades have revealed the vulnerability of both natural ecosystems and nearby settlements to the alteration of the hydrographic network and peatland landscapes.

The consequences of this transformation for natural complexes and the ongoing processes include:

- Degradation of peatlands due to organic matter decomposition and the development of wind erosion.
- Decline in both the quantity and quality of surface water during low-flow periods.
- Increase in the frequency and severity of droughts and floods.
- Conversion of valuable mire areas into dryland habitats, leading to the disappearance of autochthonous flora and fauna and a reduction in the ranges of rare species.
- Peatlands cease to perform their natural functions of regulating water flow and carbon cycles.
- Peat and forest fires.
- Settlements located in areas where water is discharged from peatland systems are increasingly affected by high water levels during flood events, as peak flows tend to exhibit shorter durations and higher amplitudes compared to undisturbed natural conditions.

Following the cessation of agricultural use of the mirelands, a network of drainage channels remained in place. Some of these channels continue to actively divert water, while others are partially or fully obstructed by beaver dams. Based on satellite imagery, a vector dataset of the channel network was created (Figure 1).

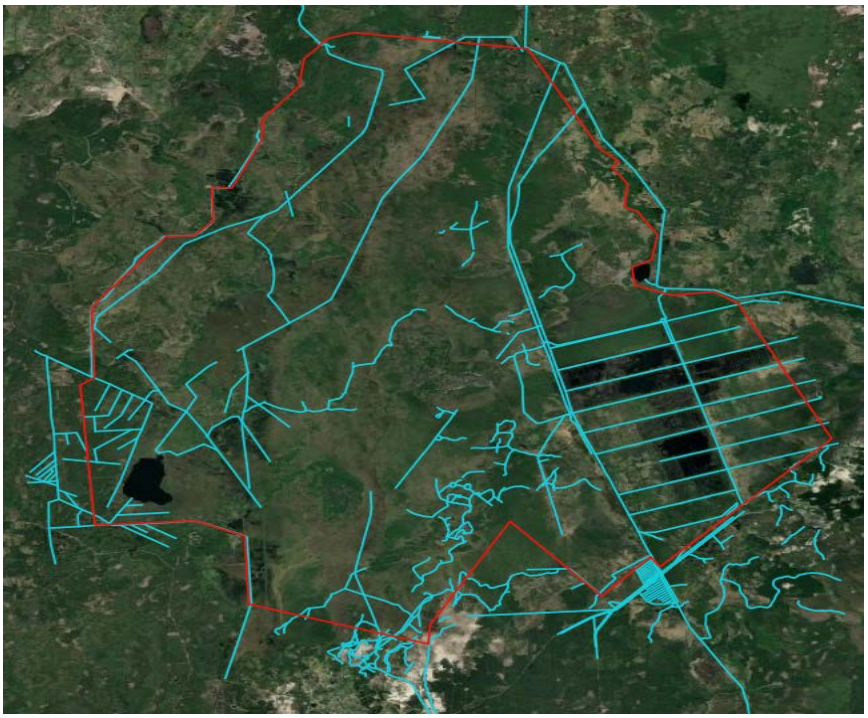


Fig. 1. *Identified drainage channel network within the Somyne Mire (ESRI Imagine, imagery date: 5 October 2021)*

The dataset also includes channels that were illegally constructed for amber extraction. Each of these structures influences the mire differently depending on the season. During the summer, these channels may remain dry, whereas in spring they often actively drain water beyond the wetland boundary.

Therefore, we conducted an assessment of the impact of the existing channels on water retention conditions across the mire area.

We begin by examining a radar-based model of the area (VH polarisation, Sentinel-1) prior to the flood event, using imagery acquired on 7 May 2019 (Figure 2a).

a) b)

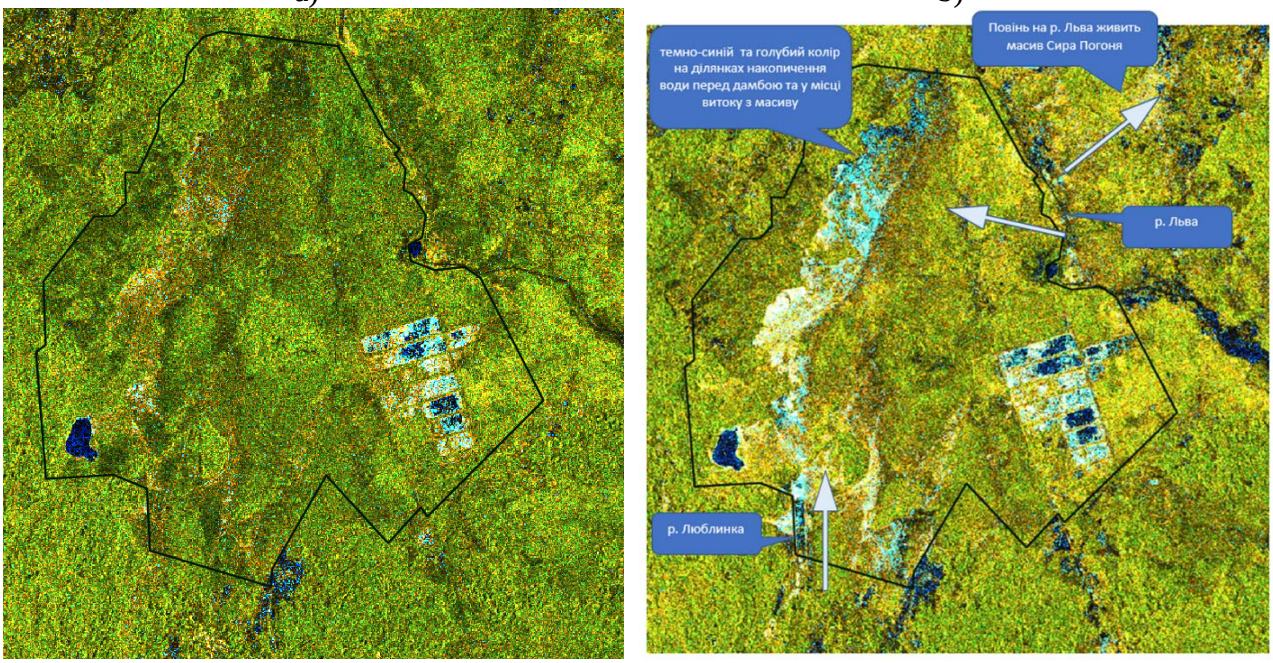


Fig. 2. *The Somyne mire: (a) during the low-flow period; (b) under the influence of flood conditions in the Lva River basin*

We now turn to the rainfall-induced flood event of 16–19 May 2019, which affected a large part of the Sarny district (within the Sluch and Stvyha river basins). Further details on the progression of the flood can be found via online resources [2, 3]:

This event can be classified as a hydrological occurrence with a 5% exceedance probability.

The radar model (Figure 2b), based on VH polarisation (vertical transmission, horizontal reception) and acquired on 17 May 2019, illustrates the flooded areas and zones of elevated soil moisture. Dark blue and light blue tones correspond to open water surfaces.

It is important to note that models derived from optical imagery are generally unsuitable for monitoring rainfall-induced flooding, as such events are typically accompanied by persistent cloud cover.

The analysis of the image indicates that the Lva River (a tributary of the Stvyha) plays a significant role in replenishing the water reserves of the mire from the east. The southern inflow is provided by the Lyubonka River (a tributary of the Sluch), which has now been transformed into a main channel of the drainage system. During peak flow conditions, water overflows onto the floodplain, facilitating its movement into the mire area located between the Lva and Sluch rivers.

This process contributes to the establishment of a favourable water and air regime for the development of mire ecosystems.

During peak water levels within the Somyne mire, the most significant artificial structure is the dam stretching from the south-western to the northern part of the mire. Its position is clearly delineated by the western boundary between the blue and light-yellow zones (Figure 3).

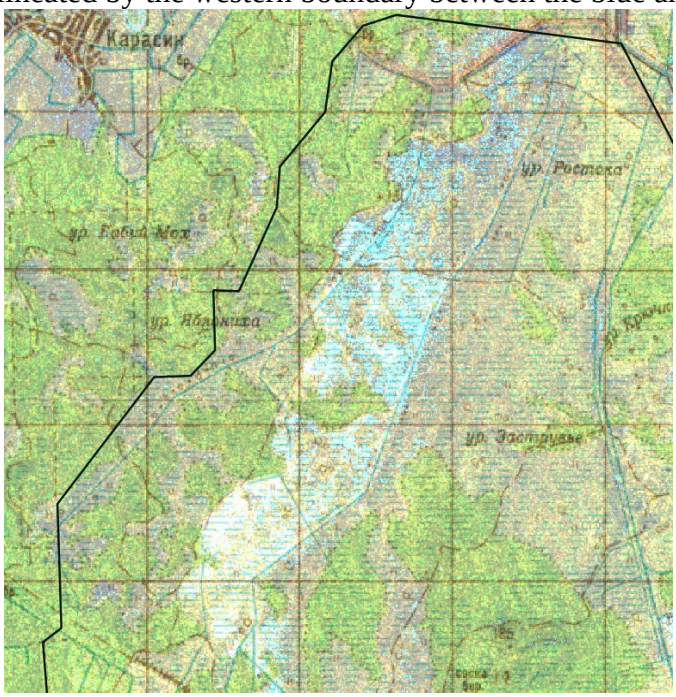


Fig. 3. *Influence of the dam on surface runoff distribution – overlay of a topographic map and a VH-polarised radar model based on Sentinel-1 imagery from 17 May 2019*

As observed, the area beyond the dam also becomes inundated during periods of high water. However, the pronounced contrast in backscatter intensity indicates that over the years the dam has created a distinct landscape gradient by impeding surface water flow: the eastern side is clearly more saturated. To facilitate spatial interpretation, a fragment of a topographic map is overlaid on the surface moisture model.

As the flood recedes and the low-flow period begins, water returns to the river channels, and the drainage function of the canal network becomes evident. Water is no longer retained within the mire. Consequently, open water bodies vanish by mid-spring, adversely affecting conditions for the development of autochthonous flora and fauna. The peat soils of the mire do not become saturated; instead, they release moisture into the drainage system. This contributes to low-flow conditions during dry periods and increases the risk of wildfires on desiccated peatland areas.

It should be noted that in recent years, intensive drainage of water from the western (post-dam) part of the Somyne Mire has been carried out via a canal constructed along the boundary between the Rivne Nature Reserve and the state forestry enterprise "Forests of Ukraine".

A satellite image fragment (Figure 4) illustrates the impact of this construction. Surface runoff accumulation lines are shown in pink. As can be seen, the canal intercepts and diverts groundwater that would otherwise recharge surrounding areas extending towards the village of Karasyn. Field surveys have confirmed that the canal is 7 metres wide and approximately 2 metres deep. A continuous stream has formed within the channel, with a water depth of up to 1.5 m and a measured discharge of 145 L/s.

For comparison, the Lva River at the Somyne Mire section had a discharge of 385 L/s during the same period. However, its catchment area is 965.28 km², whereas the canal's drainage area is approximately 10 km².

Discharges ranging from 100 to 120 L/s were also recorded at other outlets from the mire. Therefore, when comparing the specific runoff at the time of observation (mid-August 2024) — 14.5 L/s/km² from the Somyne Mire versus 0.4 L/s/km² from the Lva River — it can be concluded that the drainage network within the Somyne Mire is actively diverting significant volumes of water from the peatland, thereby desiccating the peat soil layers.

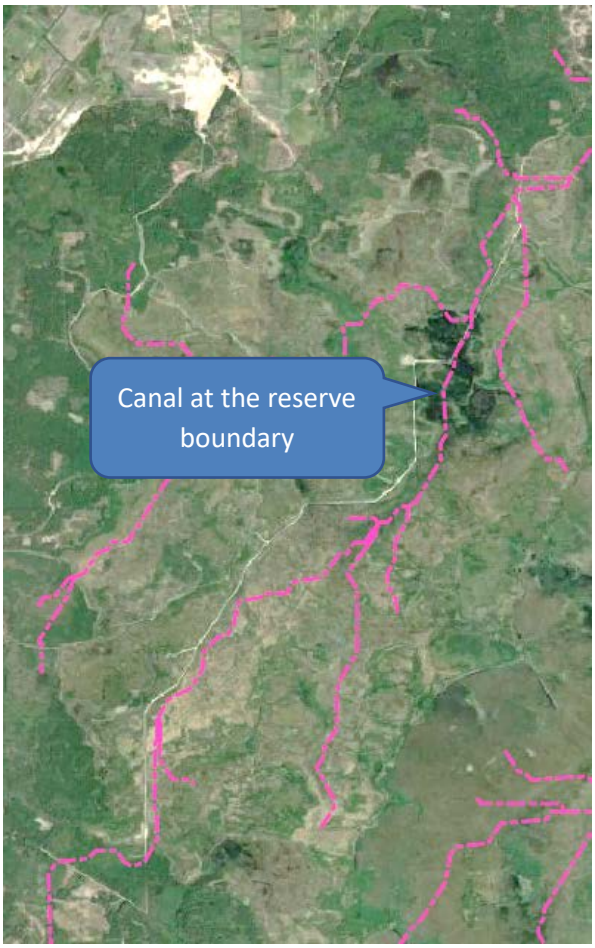


Fig. 4. *Canal constructed along the western boundary of the Somyne Mire*

Deep channels that cut entirely through the peat layer cause a decline in the groundwater table by disrupting the capillary connection between the upper and water-saturated soil horizons. Although such a channel may act as a barrier to the spread of fire under windless conditions (provided it contains sufficient water), it also contributes to an increase in the amount of deadwood. Most critically, it creates a layer of dry peat that is virtually impossible to extinguish across large areas — in the case of the Somyne Mire, this covers approximately 13 km².

A similar pattern is observed with other channels within the mire (see Figure 1). Many of them have lost their flow capacity due to beaver dams. Nevertheless, at the time of field inspection (mid-August 2024), the total volume of water being systematically drained from the mire via the reclamation channel network amounted to approximately 350 L/s.

To support the conservation of the Somyne Mire, and with the technical assistance of experts from the Frankfurt Zoological Society, preparation of project documentation for the restoration of the mire's hydrological regime has been initiated as part of the *Polesia – Wilderness Without Borders* initiative [4]. Key Restoration Measures:

1. Termination of the operation of artificial drainage channels that excessively dry out the mire during the low-flow period, by constructing dams made from local soil material deposited along the channel banks during their initial excavation.
2. Implementation of project-based and post-project monitoring of mire restoration dynamics. Preparation of documentation for impact adjustment and justification of new intervention sites, if required.

Expected Outcomes of the Project Implementation:

- Restoration of runoff formation conditions, hydrochemical parameters, and water level regimes to values typical for mire ecosystems.
- Activation of natural recovery mechanisms within the peatland ecosystem.
- Rehabilitation of mire landscapes capable of performing their natural functions, including water regime regulation, organic matter accumulation, and the reproduction of wetland flora and fauna.
- Increased baseflow in small rivers during dry periods, along with a reduction in peak discharge and water levels during flood events.

References

1. Google Maps. Somyne wetland channel network. [Map]. Available at: https://maps.app.goo.gl/nVHqWgTBzdn34neg7 (Accessed: 22 June 2025).

2. TSN.ua. (2019, May 17). *Na Rivnenshchyni pislia rekordnoi zlyvy potonulo selo, liudy zalyshylysia bez yizhi ta vody* [After record rainfall in Rivne region, a village was flooded; residents left without food and water]. Available at: https://tsn.ua/ukrayina/na-rivnenschini-pislya-rekordnoyi-zlivi-potonulo-selo-lyudi-lishilisya-bez-yizhi-ta-vodi-1347141.html (Accessed: 22 June 2025).

3. Slonets B. (2019, May 23). *Velyka voda v Rokytnomu: zatopleni budynky, znyshcheni polia, rozvalena doroha* [Flood in Rokytne: flooded houses, destroyed fields, ruined roads]. Rivne Vechirnie. Available at: https://rivnepost.rv.ua/news/velika-voda-v-rokitnomu-zatopleni-budinki (Accessed: 22 June 2025).

4. Frankfurt Zoological Society. *Polissya – Wild nature without borders*. Available at: https://ukraine.fzs.org/en (Accessed: 22 June 2025).

ВПЛИВ МЕРЕЖІ КАНАЛІВ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ БОЛОТНОГО МАСИВУ СОМИНЕ В КОНТЕКСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ЙОГО ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ

Василь КОРБУТЯК,
Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, Україна
https://orcid.org/0000-0002-8273-2306

Ігор СТАТНИК
Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, Україна
https://orcid.org/0000-0001-7007-7319

Віктар ФЯНЧУК
Представництво Відділення Франкфуртського зоологічного товариства в Україні
вул.Технічна, 4, м. Львів, 79007, Україна
https://orcid.org/0009-0000-7224-8740

Ярослав ХОДНЕВИЧ
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
бул.Чоколівський, 13, м. Київ, 03186, Україна
https://orcid.org/0000-0002-5510-1154

Даніель БЕНАТОВ
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9626-6759

Анатолій ЛІЩИНСЬКИЙ
Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, Україна
https://orcid.org/0009-0002-0289-1567

Анотація

Оцінка впливу гідрографічної мережі на режим поверхневого стоку виконано для обгрунтування комплексу заходів з відновлення та збереження болотного масиву Сомине. Дозволяють сформувати висновки щодо гідрологічних особливостей функціонування масиву та окреслити перелік необхідних організаційних та інженерних заходів. Результати дослідження підкреслюють важливість активних заходів з ревіталізації болотних екосистем у контексті зміни клімату та зростаючого тиску на природні ресурси.

Ключові слова: торфовище, меліорація, Sentinel-1, гідрологічна реабілітація, Сомине, Західне Полісся, паводок, пожежна небезпека.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330411

SEARCH FOR NEW AFFORDABLE SORBENTS FOR PROTECTION OF WATER RESERVOIRS FROM POLLUTION

Dmytro KOROBIY, Oleksandr KHOKHOTVA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: dkorobiy@gmail.com

Abstract

Pollution of water bodies in the world causes a growing need to find new, effective, selective, affordable and environmentally friendly sorbents for the removal of pollutants. Analysis of existing research emphasizes the importance of developing both highly effective and cheap, non-toxic and easily renewable sorbents. Natural materials, such as lignocellulosic sorbents (e.g. sawdust) and mineral ones, are promising in this regard. Among these natural materials, sawdust has its advantages as a waste of the woodworking industry, which makes its use convenient and economically profitable. Natural raw materials do not always have the desired sorption properties. However, they can be improved by modifying the surface with various functional groups. Research and development of methods for purifying water bodies from heavy metals, such as copper, are particularly important, since this metal can pollute natural water resources through industrial use and, as a result, accumulate over time in the body. To date, the use of modified lignocellulosic sorbents, in particular pine sawdust, for water purification from heavy metals has not been sufficiently studied. In this regard, in the study, it was decided to study the sorption properties of pine sawdust modified with urea and ammonium phosphate, since these reagents are able to generate functional groups with nitrogen and phosphorus, which can retain d-metal ions, in particular copper. The process of modifying pine sawdust included the following stages: sawdust samples were filled with solutions of ammonium phosphate and urea of appropriate concentration, settled, dried in air, calcined in a drying oven, washed with hot distilled water to neutral pH and dried to constant mass. The sorption properties of modified sawdust were studied by determining the change in the concentration of a 2 mM copper (II) sulfate solution before and after sorption, and the concentration of Cu^{2+} ions was determined by the back titration method. Before titration, the pH of the solutions after sorption was also measured.

Keywords: *water purification, sorption properties of pine sawdust, sawdust modification, modification with urea and ammonium phosphate.*

With the development of industry in the world, the relevance of cleaning water bodies from pollution is becoming increasingly significant, both because of the harmful effects on human health and because of the growing economic costs of controlling and restoring aquatic environments [1, 2]. Not the least role in these issues is played by the threat of "invisible pollutants", which are resistant to traditional water purification methods and can become increasingly toxic, affecting aquatic ecosystems and human health [3]. All this leads to the need to find more effective and selective sorbents capable of removing pollutants from low-concentrated solutions of various nature and at the same time affordable and cheap.

Having analyzed the known studies of various sorption materials for possible water pollutants, we see that in addition to the development of new effective and highly selective sorbents, the issue of developing relatively

cheap, non-toxic and easily renewable sorbents is also important. Among such materials, one can note the use of natural sorbents, for example, lignocellulosic, such as sawdust, as well as various mineral sorbents. Speaking of sorption by natural sorbents, one can also cite as an example the ability of Ukrainian kaolinite clay to purify water from nickel, due to its sorption properties [4]. It is also worth noting that the purification of water bodies using kaolinite clay is especially important for practical application in conditions of economic constraints, taking into account the availability of the material. However, if we compare sawdust and mineral or other natural sorbents, the advantage of sawdust is that its use is quite convenient and promising, both from the point of view of economy, since it is waste from the woodworking industry, and in terms of secondary processing of raw materials.

Naturally, natural raw materials do not always have the desired sorption properties or high efficiency in relation to the components required for the extraction from water. However, such properties or efficiency can be improved by modifying the surface with various functional groups-modifiers.

Among other pollutants that can enter aquatic ecosystems, no less important today is the research and development of methods for purifying water bodies from heavy metals (metals that are poorly excreted from the body and, accordingly, accumulate over time), or metals that can be used as a material for process water pipes at any enterprise, but the increase in their content in natural water resources will also be considered pollution. Among such metals, copper is common, which is also a heavy metal and, due to its resistance to corrosion, can be used for the production of water pipes (for example, cooling systems).

Having analyzed the current experience on the problems of sorption of various pollutants of water bodies by various materials, it is clear that the areas of using natural raw materials for sorption of heavy metals, in particular copper as a frequently used material for water mains in industry, as well as the use of modified lignocellulose sorbents for water purification from inorganic pollutants, in particular heavy metals, remain understudied. In this regard, we decided to investigate the sorption properties of pine sawdust modified with urea ($CO(NH_2)_2$) and ammonium phosphate ($(NH_4)_3PO_4$), - reagents that are capable of generating functional groups with nitrogen and phosphorus, which have the potential to retain d-metal ions, due to the formation of stable complexes with them [5, 6].

The process of modification of pine sawdust was carried out as follows. To modify the sawdust, a series of solutions with ammonium phosphate and urea were prepared in the concentration range of 0–0.5 M for $(NH_4)_3PO_4$ and 0–2.0 M for $CO(NH_2)_2$. Each individual sample of sawdust was filled with the appropriate modifying solution and left to settle. After drying the obtained samples in air and calcining in a drying oven, they were washed on a filter to neutral pH with hot distilled water. After that, the samples were dried to constant mass.

The study of the sorption properties of the modified sawdust samples was carried out by determining the change in the concentration of 2 mM aqueous solution of copper (II) sulfate ($CuSO_4$) before and after sorption. The concentration of Cu^{2+} ions was determined by the back titration method. Before titration, the pH of the solutions after sorption of Cu^{2+} ions and 2 mM copper (II) sulfate solution used to study the sorption properties of the modified sawdust was measured. The table 1 below shows the results of studies on the sorption of Cu^{2+} ions by modified sawdust.

After analyzing the results of the sorption of modified sawdust, it is clear that for the modification of pine sawdust, ammonium phosphate solutions are better to use with a concentration 3-4 times lower than the urea concentration.

The ratio of urea:ammonium phosphate = 3-4 for pine sawdust modification resulted in higher efficiency of copper removal. Higher concentrations of modification solutions possibly promoted higher level of introduction of N and P into cellulosic material. Heavy metal can be retained in lignocellulose by several mechanisms, mainly ion exchange and complexation. Higher N and P content in pine sawdust is revealed in lower pH drop after sorption with simultaneous low residual copper concentration.

able 1. The results of studies on the sorption of Cu2+ ions by modified sawdust

Concentration of modifying solution and main parameters studied	Name of the modified sawdust sample										2 mM $CuSO_4$ solution **
	00*	1	2	3	4	C0	C1	C2	C3	C4	
C_M ($(NH_4)_3PO_4$)	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
C_M ($CO(NH_2)_2$)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	0	0,5	1,0	1,5	2,0	-
Concentration of Cu^{2+} ions after sorption, mg/l	89,0	17,5	2,4	0,8	0,8	35,0	33,4	15,9	0,8	0,8	135,0
% sorbed ions Cu^{2+}	34,1	87,1	98,2	99,4	99,4	74,1	75,3	88,2	99,4	99,4	-
pH of solutions after sorption of Cu^{2+} ions	3,99	3,31	3,31	3,57	3,73	2,90	3,01	3,26	3,56	3,73	5,22

** – the name "00" corresponds to distilled water, without modifying reagents, as a blank sample.*
*** – 2 mM aqueous solution of copper (II) sulfate used for sorption studies; the results in this column are given for comparison with the sorption properties of samples of modified pine sawdust.*

Reference

1. Li Lin, Haoran Yang and Xiaocang Xu. Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. Frontier in Environmental Science 30 June 2022 doi: 10.3389/fenvs.2022.880246

2. Dr. Faisal Ali Mohamed Baba. Water Pollution: Causes, Impacts, and Solutions: a critical review. ResearchGate June 2024 DOI: 10.37376/jsh.vi76.5785.

3. da Silva Antunes de Souza, M.C. y Antunes de Souza, G.K. (2019). Invisible pollutants: environmental, economic and social impacts as threats to water quality. Revista Jurídicas, 16 (2), 95-107. DOI: 10.17151/jurid.2019.16.2.7.

4. Yuliia Tracha, Filip Bujakowskic, Eugeniusz Kodaa, Lukasz Mazura, Krzysztof Nejbertd, Anna Podlaseka, Magdalena Daria Vaverkova. (2022). Characterization of adsorbents from Ukrainian kaolinite clay for the sorption of nickel: insight and practical application for water treatment in conditions of economic constraints. Desalination and Water Treatment 278 (2022) 1–12.

5. Chiara Canovi, Francesco Genua, Kevin D'Addazio, Lara Gigli, Alessandra Forni, Petr Michálek, Mauro Carcelli, Dominga Rogolino and Luca Rigamonti. Studies on the Effect of Diamine Elongation in Copper(II) Complexes with NNO Tridentate Schiff Base Ligands. Inorganics 2025, 13, 94 https://doi.org/10.3390/inorganics13030094.

6. Malwina Gabryel-Skrodzka, Martyna Nowak, Anna Teubert and Renata Jastrzab. Coordination Chemistry of Phosphate Groups in Systems Including Copper(II) Ions, Phosphoethanolamine and Pyrimidine Nucleotides. Int. J. Mol. Sci. 2022, 23, 13718. https://doi.org/10.3390/ijms232213718.

ПОШУК НОВИХ ЕКОНОМІЧНО ДОСТУПНИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВОДОЙМ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ

Дмитро КОРОБІЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0007-7039-5721

Олександр ХОХОТВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-2607-9242

Анотація

Забруднення водойм у світі зумовлює все більшу потребу в пошуку нових, ефективних, селективних, доступних та екологічно безпечних сорбентів для вилучення забруднювачів. Аналіз існуючих досліджень підкреслює важливість розробки як високоефективних, так і дешевих, нетоксичних та легко відновлюваних сорбентів. Природні матеріали, такі як лігноцелюлозні сорбенти (наприклад, тирса) та мінеральні є перспективними в цьому плані. Серед цих природніх матеріалів тирса має свої переваги, як відхід деревообробної промисловості, що робить її використання зручним та економічно вигідним. Не завжди природна сировина має бажані сорбційні властивості. Однак їх можна покращити шляхом модифікації поверхні різноманітними функціональними групами. Дослідження та розробка методів очищення водойм від важких металів, таких як мідь, є особливо важливими, оскільки цей метал може забруднювати природні водні ресурси через промислове використання і, як наслідок, накопичуватися з часом в організмі. На сьогоднішній день ще недостатньо досліджено використання модифікованих лігноцелюлозних сорбентів, зокрема соснової тирси, для очищення води від важких металів. У зв'язку з цим, у дослідженні було вирішено вивчити сорбційні властивості соснової тирси, модифікованої сечовиною та амоній фосфатом, оскільки ці реагенти здатні генерувати функціональні групи з нітрогеном та фосфором, які можуть затримувати йони d-металів, зокрема міді. Процес модифікації соснової тирси включав такі етапи: зразки тирси заливали розчинами амоній фосфату і сечовини, відповідної концентрації, відстоювали, висушували на повітрі, прожарювали у сушильній шафі, промивали гарячою дистильованою водою до нейтрального pH та сушили до постійної маси. Сорбційні властивості модифікованої тирси досліджували шляхом визначення зміни концентрації 2 мМ розчину купрум (II) сульфату до та після сорбції, а концентрацію йонів Cu^{2+} визначали методом зворотного титрування. Перед титруванням також вимірювали pH розчинів після сорбції.

Ключові слова: очистка водойм, сорбційні властивості соснової тирси, модифікація тирси, модифікація сечовиною та амоній фосфатом.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329725

COMPARISON OF THE INFLUENCE OF IRON AND COPPER IONS ON WATER POLLUTION PROCESSES AT 20 ºC USING HYDRAZINE

Mykola KOSMYNA, Yuliia NOSACHOVA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: kosmynaeco@gmail.com

Abstract

The kinetics of oxygen removal processes from water using gyrazine hydrate were studied. A comparison method was used to determine a more effective reagent. It was shown that the speed and efficiency of the process increase with increasing reagent concentration. The initial oxygen concentration in water in this case depended on the temperature of the environment. The process was monitored with an oxygen meter by changing the oxygen concentration in a hermetically sealed container. At a temperature of 20°C, the oxygen binding process lasted for more than 60 minutes. With an increase in the concentration of iron (II) ions, greater efficiency was achieved than when using copper (I) ions.

Keywords: *comparison method, iron (II) sulfate, copper (I) oxide, hydrazine, corrosion, oxygen meter, electrochemical deoxidation methods.*

Today, corrosion is one of the main technical and economic problems of the energy industry, which requires constant attention, regular monitoring of the condition of equipment and the introduction of modern protection technologies. The consequences of the influence of corrosion can be the appearance of cracks and ruptures in pipelines under the influence of corrosion cracking, which is especially dangerous for high-temperature and high-pressure systems.

Deoxidation is an important area of ecological research, as it is one of the effective methods for combating metal corrosion. The use of iron and copper ions plays a significant role in studying water deoxidation processes, since their combinations in heaps at different temperatures can yield meaningful results.

Methods using redox sites consist of modified ion exchange resins that use cation exchangers modified with iron (II) and copper (I) compounds, which have reducing properties. This method is promising for industry and energy, since it does not leave toxic residues [1] and Polymer membranes - they can also be used for water deoxygenation by filtration [2].

It is worth noting that the deoxygenation process is closely linked to corrosion and redox reactions. Moreover, the reduction of oxygen levels influences the concentration of dissolved iron in water, which in turn can impact water quality and its overall ecological condition [1].

To identify the most effective method of water deoxygenation, a comparative analysis was conducted. The study was based on graphical representations and tables that clearly illustrate the

kinetics of oxygen concentration changes when using copper and iron ions at 20°C. The aim of our study was to compare the effectiveness of adding copper and iron ions at a temperature of 20 ºC and with the addition of hydrazine hydrate. to determine the efficiency of the water deoxygenation process from temperature when using hydrazine hydrate. Distilled water was used as the working medium. During the experiment, a sealed system and an oxygen meter were employed. A water bath was used to maintain a consistent temperature throughout the study.

Based on the results of the research, dependences were obtained that demonstrate the kinetics of changes in oxygen concentration over one hour. Tables 1 and 2 show the data on changes in oxygen concentration at different concentrations of hydrazine, copper(I) and iron(II) ions at 20°C.

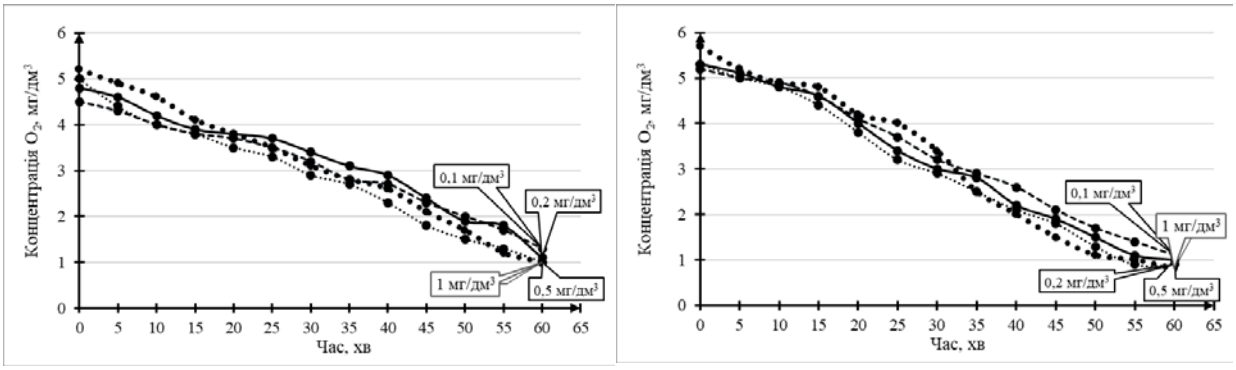
Table 1. Oxygen removal efficiency using hydrazine hydrate at 20°C and iron(II) ion concentration for 1 hour

Initial concentration O_2, mg/dm^3	**Hydrazine concentration, mg/dm^3**	**Concentration of $FeSO_4$, mg/dm^3**	**Residual concentration O_2, mg/dm^3**
4,5	10	0,1	1,3
4,8	10	0,2	1,1
5	10	0,5	1
5,2	10	1	1
5,2	20	0,1	1,1
5,3	20	0,2	1
5,3	20	0,5	0,9
5,7	20	1	0,8
6	50	0,1	0
5,2	50	0,2	0
5,6	50	0,5	0
5,4	50	1	0

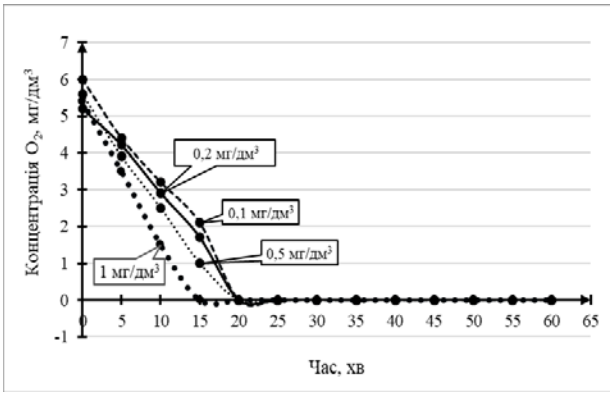
Table 2. Oxygen removal efficiency using hydrazine hydrate at 20°C and copper(I) ion concentration for 1 hour

Initial concentration O_2, mg/dm^3	**Hydrazine concentration, mg/dm^3**	**Concentration of $FeSO_4$, mg/dm^3**	**Residual concentration O_2, mg/dm^3**
5,2	10	0,1	3,2
5,2	10	0,2	3,3
5,1	10	0,5	3,1
5,3	10	1	3
4,7	20	0,1	0,7
4,9	20	0,2	0,6
5	20	0,5	1,2
5	20	1	1
5,3	50	0,1	0,3
5,1	50	0,2	0,2
5,4	50	0,5	0,1
5,2	50	1	0,1

As a graphical example, curves are presented (fig. 1 and fig. 2) showing the kinetics of changes in oxygen concentration over time at different doses of hydrazine hydrate and iron(II) and copper(I) ions at 20°C.



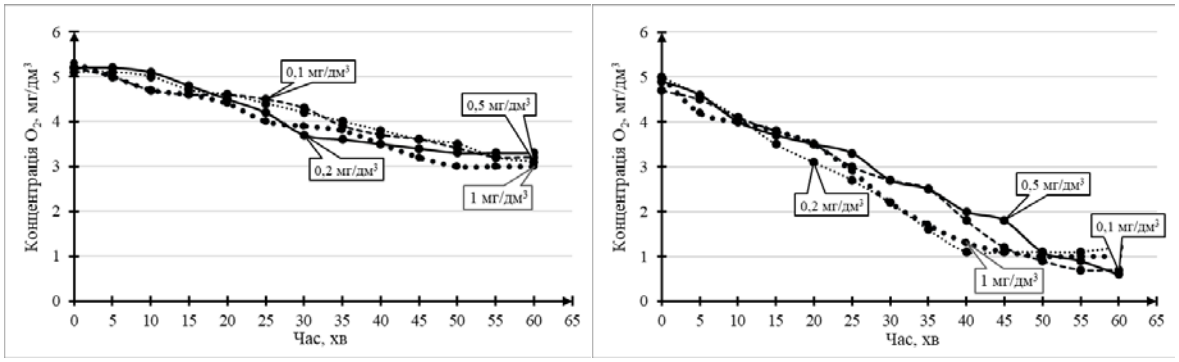
1 – hydrazine hydrate dose 10 mg/dm³ 2 – hydrazine hydrate dose 20 mg/dm³



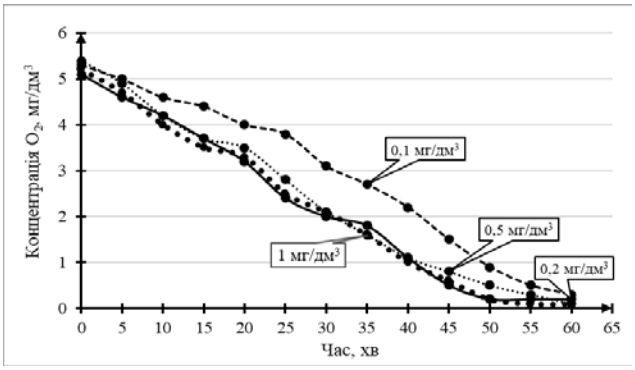
3 – hydrazine hydrate dose 50 mg/dm³

Figure 1. *Kinetics of changes in oxygen concentration in water over time at different doses of hydrazine hydrate and iron (II) ions at 20 ºC*

At a temperature of 20°C (fig. 1), the trend shows a slight increase in the efficiency of oxygen removal, remaining at a similar level as in previous cases. However, a significant reduction in the time required to reach a 0 oxygen concentration can be observed when using a hydrazine dose of 50 mg/dm³, with the time decreasing from 40 minutes to 20–25 minutes. Additionally, at a dose of iron (II) ions ranging from 0.1 to 1 mg/dm³, this effect is also noticeable [3].



1 – hydrazine hydrate dose 10 mg/dm^3 2 – hydrazine hydrate dose 20 mg/dm^3



3 – hydrazine hydrate dose 50 mg/dm^3

Figure 2. *Kinetics of changes in oxygen concentration in water over time at different doses of hydrazine hydrate and copper (I) ions at 20 ºC*

As can be seen from pic. 2, a slight increase in the efficiency of deoxidation when using Cu+ ions as catalysts was achieved at maximum doses of reagents and elevated temperature conditions [4].

When comparing reagents, it can be noted that iron (II) sulfate reduces the oxygen concentration to zero faster than copper (I) oxide. This result was achieved at a dose of hydrazine hydrate of 50 mg/dm3.

References

1.Homelia, M., Shuryberko, M. and Holiaka, A. (2018) 'Water deoxygenation using iron containing composites', Scientific Notes of V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences, 29, pp. 64–69.

2. Homelia, M., Shablii, T., Ivanenko, O. and Krysenko, T. (2017) 'Removal of dissolved oxygen from water using modified ion exchangers' [Online]. Available at: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/7a6e4224-a45a-4d11-9dc9-a6a510f0d572/content (Accessed: [date]).

3. Kosmyna, M. та Nosachova, Y., (2025). Study of the influence of iron and copper ions on water deoxygenation processes at different temperatures using hydrazine reagent. *Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*. (1), 75–83.

ПОРІВНЯННЯ ВПЛИВУ ІОНІВ ЗАЛІЗА І МІДІ НА ПРОЦЕСИ ЗНЕКИСНЕННЯ ВОДИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ 20 °С З ВИКОРИСТАННЯМ ГІДРАЗИНУ

Микола КОСМИНА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр.Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0004-9692-3930

Юлія НОСАЧОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр.Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6431-7128

Анотація.
Вивчено кінетику процесів видалення кисню із води за допомогою гіразин гідрату. Застосовано метод порівняння для визначення більше ефективного реагенту. Показано, що швидкість та ефективність процесу зростає при підвищенні концентрації реагенту. Вихідна концентрація кисню у воді в даному випадку залежала від температури середовища. Процес контролювали киснеміром по зміні концентрації кисню, що знаходились у герметично закритій ємності. При температури 20°С процес зв'язування кисню тривав понад 60 хв. При збільшенні концентрації іонів заліза (II) досягнуто більшої ефективності, ніж при використанні іонів міді (I).

Ключові слова: *метод порівняння, сульфат заліза (II), оксид міді (I), гідразин, корозія, киснемір, електрохімічні методи знекиснення.*

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330445

INFLUENCE OF COMPETING IONS ON THE EFFICIENCY OF DEFLUORINATION ON IRON-CONTAINING ADSORBENT

Evgeniy KOSTENKO[1], Tetiana OBUSHENKO[1], Arcady SHAHNOVSKY[1], Nataliia TOLSTOPALOVA[1], Olga SANGINOVA[1], Oleksandr BOLIELYI[2]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
[2]*TU Bergakademie Freiberg, Institute of Experimental Physics*
Leipziger Str. 23, 09599 Freiberg, Germany
e-mail: tio1963@gmail.com

Abstract

Groundwater sources in certain regions of Ukraine are characterized by elevated concentrations of fluoride, which may reach up to 14 or even 18 mg/dm³. The intake of excessive amounts of fluoride ions through drinking water can seriously harm human health. Adsorption technology is a promising method for water defluoridation due to its simplicity, efficiency, and cost-effectiveness. However, the use of adsorption for fluoride removal from water faces several challenges, one of which is the reduced removal efficiency in the presence of foreign (competing) ions. Therefore, the effect of foreign ions on fluoride removal was investigated using iron-based adsorbent samples. Foreign ions compete with fluoride ions for adsorption sites on the surface of the adsorbent material, thereby reducing the overall efficiency of fluoride removal. The results obtained indicate that all studied ions adversely affect the process efficiency to varying degrees. The phosphate ion exhibited the most significant negative impact, as it is specifically adsorbed onto high-valent metal oxides and hydroxides via inner-sphere complexation. Therefore, it can easily compete with fluoride ions, which are also specifically adsorbed. Nitrate and chloride ions are non-specifically adsorbed (via outer-sphere complexation) onto metal oxides and thus cannot effectively compete with fluoride ions at equal concentrations. Sulfate ions may be adsorbed both specifically and non-specifically, and therefore showed a greater competitive effect than chloride and nitrate, but less than phosphate. The concentration ratios of anions in natural and wastewater vary significantly and should be taken into account when assessing the degree of competition.

Keywords*: water purification, defluorination, iron-containing sorbents, competing ions.*

Fluorine is an element commonly found in the natural environment. It can be found in minerals, ores, the Earth's crust, the atmosphere, and living organisms. The presence of fluorides in natural waters used for domestic and drinking water supply is determined by the existence of soluble fluorine-containing compounds in soils and rocks.

Fluorine compounds are present in both surface and groundwater, into which they enter from soils and rocks as a result of the weathering of fluorine-containing minerals by groundwater and surface runoff. Atmospheric precipitation is also a source of fluoride. Human activity has a significant impact

on the migration and enrichment of fluorine in groundwater. In recent years, the development of industrial production (such as aluminum, semiconductors, iron and steel, pesticides, and agricultural chemical fertilizers) has greatly increased fluoride pollution [1].

Relying on the natural self-purification of water bodies from fluoride is virtually unrealistic, as fluoride compounds are persistent constituents of industrial wastewater.

Fluorides have a high affinity for hard tissues due to their ability to chemically bind with calcium phosphates [2]. Since fluorine imparts exceptional chemical stability to its compounds, certain amounts are essential for the human body to ensure the optimal structure of bones and teeth.

In addition to its beneficial effects on the human body, there are also examples of fluorine's toxic effects. Skeletal fluorosis is one of the most severe manifestations of fluoride toxicity. Fluorine can cause dental deformation and discoloration, osteochondrosis, joint stiffness and immobility, and abnormal bone growth. High concentrations of fluorine extract magnesium from lymph and blood, mobilize calcium from bones, which often leads to its deposition in the kidneys, muscles, and lungs.

According to many authors, fluoride intoxication may result in damage to the gastrointestinal tract, kidneys, liver, endocrine and nervous systems, reproductive dysfunction, and reduced nonspecific resistance of the body [3].

According to the latest World Health Organization guidelines, the fluoride content in drinking water should range between 0.5-1.5 mg/dm³. Due to socio-economic and geographical factors, the maximum allowable concentrations of fluoride in drinking water vary slightly across countries: USA – 0.6-0.9 mg/dm³, India – 1.0-1.5 mg/dm³, Ukraine – 0.7-1.5 mg/dm³ [1].

The use of groundwater for drinking water supply in more than 20 developed countries is impossible without removing excess fluoride. The issue of defluoridation of groundwater used for drinking purposes is also relevant for Ukraine, as fluoride concentrations in its underground sources average 2.5-5.0 mg/dm³, and in some regions, such as Poltava oblast, even higher values are recorded (up to 12 mg/dm³) [1].

The fluoride level in drinking water can be controlled through various water treatment processes such as adsorption, coagulation, electrocoagulation-flotation, chemical precipitation, and ion exchange. These processes can remove excess fluoride from water or, in the case of water fluoridation, add controlled amounts of fluoride to achieve optimal dental health benefits. Among the wide range of technologies, adsorption has attracted considerable attention as a promising strategy for fluoride removal. Adsorption technology has become a favorable approach to defluoridation due to its simplicity, efficiency, and cost-effectiveness.

Over the past decade, various types of defluoridation adsorbents have been developed, including those derived from natural minerals, industrial wastes, and biomass, as well as metal oxides, hydroxides, and carbon-based materials.

Recently, iron-based adsorbents have gained increasing attention. The advantages of iron-containing adsorbents include their high adsorption rate, large adsorption capacity, and low cost [4].

The aim of this study was to investigate the effect of competing ions on the efficiency of fluoride ion adsorption using iron-containing adsorbents A03 and A06. Foreign ions may contend with fluoride ions for adsorption sites on the surface of the adsorbent material, thereby reducing overall fluoride removal efficiency. The degree of competition in the adsorption process depends on the concentration and chemical characteristics of the competing ions.

Natural water contains anions such as chloride (Cl^-), nitrate (NO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), carbonate (CO_3^{2-}), and phosphate (PO_4^{3-}). These ions can compete for adsorption sites and form stable complexes with F^-. Additionally, bicarbonate and carbonate may form complexes with the adsorbent surface itself. This interaction reduces the number of active adsorption sites available for fluoride adsorption [5].

For the sorption experiments, the adsorbent samples were weighed using an analytical balance. A NaF solution was prepared by dissolving a calculated amount of solid salt in distilled water. When pH adjustment was required, it was achieved using 0.1 M HCl and 0.1 M KOH solutions. Potassium salts of nitrate, chloride, carbonate, sulfate, phosphate, and bicarbonate were used as competing ions. Various concentrations of these ions were studied: 10 mg/dm³, 20 mg/dm³, and 30 mg/dm³. The experiments were conducted using a sorbent dose of 2 g/dm³ for A03 and 6 g/dm³ for A06. The NaF solution concentration was fixed at 10^{-3} M. The pH of the solution was adjusted to 4 for A03 and 6 for A06.

The adsorbent samples were transferred into plastic sorption containers, followed by the addition of 50 cm³ of sodium fluoride solution and a calculated amount of solid salt containing the competing ion. The containers were then placed on a laboratory shaker, where the sorption process was carried out until equilibrium was established. Upon completion of the sorption process, the adsorbent was separated from the solution, and the residual fluoride ion concentration in the filtrate was determined.

In a 100 cm³ beaker, 50 cm³ of the test solution was added along with 10 cm³ of an ionic strength adjustment buffer. The beaker was placed on a magnetic stirrer, and the electrodes were immersed. After 2-3 minutes, the current fluoride concentration was recorded.

The sorption capacity (mg/g) was calculated using the following formula:

$$\mathrm{a} = \frac{(C_0 - C_e)\times 0{,}05}{m_s},$$

where C_0 is the initial concentration of fluoride ions (mg/dm³), C_e is the equilibrium concentration after sorption (mg/dm³), 0.05 is the volume of the added solution in dm³, and m_s is the mass of the adsorbent sample in grams.

The study of the effect of competing ions on fluoride ion sorption using adsorbents A03 and A06 revealed that all investigated ions had some impact on the efficiency of the process, except for nitrate ions, which at low concentrations improved fluoride adsorption on the A03 adsorbent. The results of the effect of competing ions on fluoride ion sorption for adsorbents A03 and A06 are shown in Figures 1 and 2, respectively.

The sequences of influence strength on the sorption capacity of A03 for a given initial concentration of competing ions are as follows:

- 10 mg/dm³: $CO_3^{2-}>SO_4^{2-}>HCO_3^{-}>H_2PO_4^{-}>Cl^{-}>NO_3^{-}$
- 20 mg/dm³: $CO_3^{2-}>SO_4^{2-}>H_2PO_4^{-}>HCO_3^{-}>Cl^{-}>NO_3^{-}$
- 30 mg/dm³: $CO_3^{2-}>H_2PO_4^{-}>SO_4^{2-}>HCO_3^{-}>Cl^{-}>NO_3^{-}$

Similarly, the sequences of influence strength on the sorption capacity of A06 are as follows:

- 10 mg/dm³: $H_2PO_4^{-}>Cl^{-}>NO_3^{-}>HCO_3^{-}>SO_4^{2-}>CO_3^{2-}$
- 20 mg/dm³: $H_2PO_4^{-}>HCO_3^{-}>SO_4^{2-}>Cl^{-}>CO_3^{2-}>NO^{3-}$
- 30 mg/dm³: $H_2PO_4^{-}>HCO_3^{-}>SO_4^{2-}>CO_3^{2-}>Cl^{-}>NO^{3-}$

The obtained results are in good agreement with the findings of other researchers. For instance, in [6], the authors confirm that the effect of bicarbonate can be explained by the fact that conjugate bases of weak acids produce more hydroxide ions, which compete with F^- for adsorption sites. In [7], it is noted that the decrease in the fluoride adsorption capacity with increasing bicarbonate concentration is due to a rise in solution pH.

According to the authors of [8], the adsorption mechanisms of phosphate result in its strong affinity for metal oxides and high-valent hydroxides, enabling it to effectively compete with fluoride ions. However, several authors [5] point out that, considering the typical concentration range of

natural phosphate in groundwater (from 0 to 5 mg/dm³), its impact on fluoride adsorption is unlikely to be a limiting factor for groundwater defluoridation.

Data from [7] indicate that HCO_3^-, CO_3^{2-}, and PO_4^{3-} significantly affect F^- removal because these ions undergo hydrolysis, leading to an increase in pH. As a result, more OH^- ions are available to compete with F^- for active adsorption sites, thereby reducing the overall adsorption capacity.

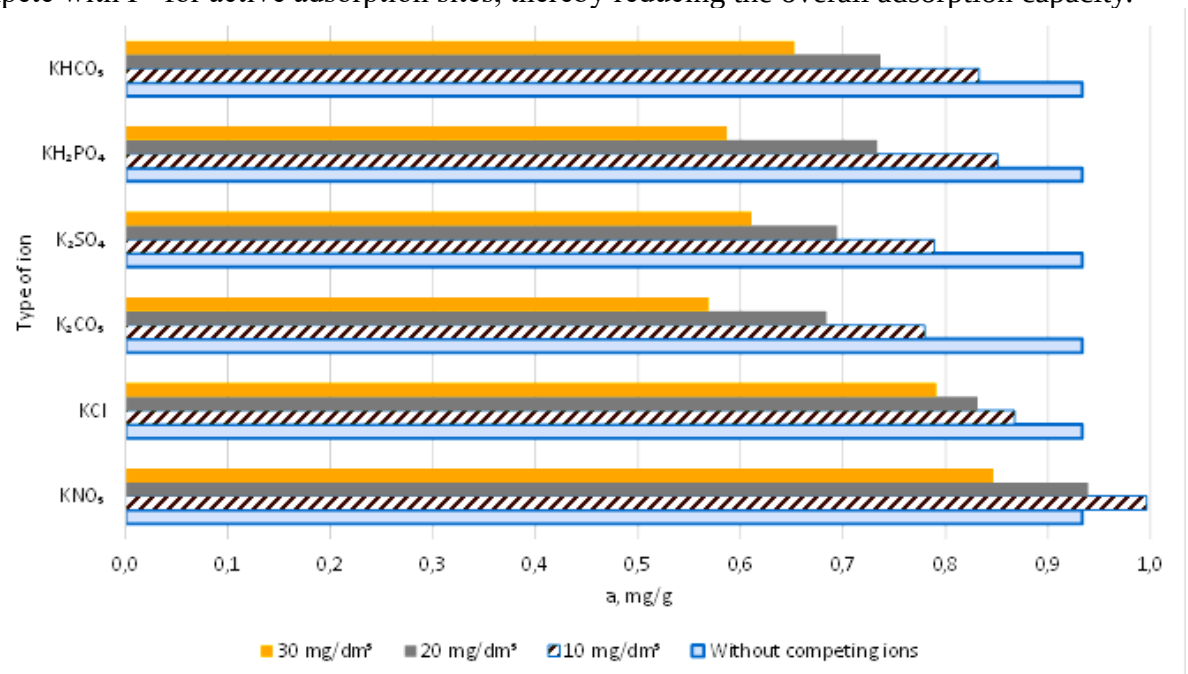


Figure 1. *The influence of competing ions on the sorption of fluoride ions on the sorbent A03*

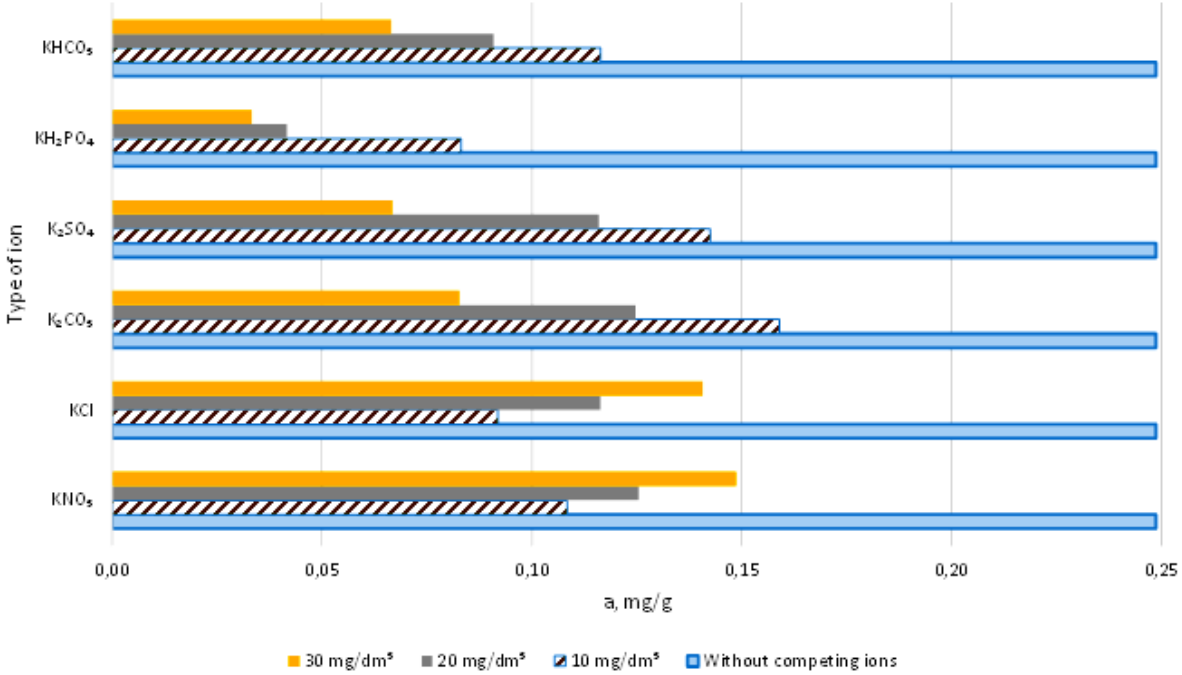


Figure 2. *The influence of competing ions on the sorption of fluoride ions on the sorbent A06*

Thus, it was established that the presence of competing ions reduces the degree of fluoride ion removal from binary solutions. Phosphate is strongly and specifically adsorbed onto high-valent metal

oxides and hydroxides through inner-sphere complexation. Therefore, it can readily compete with fluoride (F^-), which also exhibits specific adsorption behavior.

Nitrate and chloride ions, on the other hand, are non-specifically adsorbed (outer-sphere complexation) onto metal oxides and thus are poor competitors with fluoride ions at equal concentrations. Sulfate can undergo both specific and non-specific adsorption, making it a stronger competitor with fluoride than chloride and nitrate, but weaker than phosphate.

The observed order of anion competition is similar to that reported by other researchers [5]. The concentration ratios of anions in natural and wastewater vary significantly, and these ratios must be taken into account when evaluating the extent of competitive adsorption.

The presented study was conducted within the framework of the research projects "Pollutants removal of various nature from multi-component aqueous solutions by adsorption and flotation methods" (No. 0124U002058), "Industrial Wastewater Treatment Technologies Improvement Using of Artificial Neural Networks" (No. 0124U001966).

References

1. Куриленко, В. С., Толстопалова, Н. М., Сангінова, О. В., Обушенко, Т. І. (2023). Огляд методів видалення фтору з водних розчинів. *Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, (1), 52–69. https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2023.276447
2. Zhao, M., Wang, Q., Krua, L. S. N., Yi, R., Zou, R., Li, X., & Huang, P. (2023). Application Progress of New Adsorption Materials for Removing Fluorine from Water. Water, 15(4), 646. https://doi.org/10.3390/w15040646
3. Adamu D. B., Zereffa E., Segne T. A., Razali M. H., Lemu B. R. Synthesis of iron-substituted hydroxyapatite nanomaterials by co-precipitation method for defluoridation. Materials Research Express. 2022. № 10. https://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/acca65
4. De Carvalho Costa, L. R., Jurado-Davila, I. V., Oliveira, J. T. D., Nunes, K. G. P., Estumano, D. C., de Oliveira, R. A., Carissimi, E., & Féris, L. A. (2024). Exploring Key Parameters in Adsorption for Effective Fluoride Removal: A Comprehensive Review and Engineering Implications. Applied Sciences, 14(5), 2161. https://doi.org/10.3390/app14052161
5. Azari A., Kalantary R.R., Ghanizadeh G., Kakavandi B., Farzadkia M., Ahmadi E. Iron–silver oxide nanoadsorbent synthesized by co-precipitation process for fluoride removal from aqueous solution and its adsorption mechanism. RSC Adv. 2015, 5, 87377–87391. http://dx.doi.org/10.1039/C5RA17595J
6. Cai H., Chen G., Peng C., Xu L., Zhu X., Zhang Z., Dong Y., Shang G., Ke F., Gao H., et al. Enhanced removal of fluoride by tea waste supported hydrous aluminium oxide nanoparticles: Anionic polyacrylamide mediated aluminium assembly and adsorption mechanism. RSC Adv. 2015, 5, 29266–29275. http://dx.doi.org/10.1039/C5RA01560J
7. Hernández-Campos M., Polo A.M.S., Sánchez-Polo M., Rivera-Utrilla J., Berber-Mendoza M.S., Andrade-Espinosa G., LópezRamón M.V. Lanthanum-doped silica xerogels for the removal of fluorides from waters. J. Environ. Manag. 2018, 213, 549–554. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.016.

ВПЛИВ СТОРОННІХ ІОНІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕФТОРУВАННЯ НА ФЕРУМВМІСНИХ АДСОРБЕНТАХ

Євгеній КОСТЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
http://orcid.org/0000-0003-0872-2764

Тетяна ОБУШЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-0731-0370

Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2963-4026

Наталія ТОЛСТОПАЛОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7240-5344

Ольга САНГІНОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6378-7718

Олександр БОЛЄЛИЙ
ТУ Гірнича академія Фрайберга, Інститут експериментальної фізики
Leipziger Str. 23, 09599 Freiberg, Німеччина
https://orcid.org/0000-0002-5583-7970

Анотація

Джерела підземних вод у багатьох регіонах України характеризуються підвищеною концентрацією фтору, яка може сягати 14, а в окремих випадках –навіть 18 мг/дм³. Надходження надмірної кількості іонів фтору з питною водою може серйозно зашкодити здоров'ю людини. Технологія адсорбції є перспективним методом дефторування води завдяки своїй простоті, ефективності та економічній ефективності. Однак використання адсорбції для видалення фтору з води стикається з кількома проблемами, однією з яких є зниження ефективності видалення у присутності сторонніх (конкуруючих) іонів. З урахуванням цього, було досліджено вплив сторонніх іонів на видалення фтору з використанням зразків адсорбентів на основі заліза. Сторонні іони конкурують з іонами фтору за центри адсорбції на поверхні адсорбуючого матеріалу, тим самим знижуючи загальну ефективність видалення фтору. Отримані результати свідчать про те, що всі досліджувані іони негативно впливають на ефективність процесу різною мірою. Фосфат-іон виявив найбільш значний негативний вплив, оскільки він специфічно адсорбується на високовалентних оксидах та гідроксидах металів шляхом комплексоутворення у внутрішній сфері. Тому він може значною мірою конкурувати з іонами фтору, які також специфічно адсорбуються. Іони нітратів та хлоридів неспецифічно адсорбуються (шляхом комплексоутворення у зовнішній сфері) на оксидах металів, і тому не можуть ефективно конкурувати з іонами фтору за рівних концентрацій. Іони сульфатів можуть адсорбуватися як специфічно, так і неспецифічно, і тому демонструють більший конкурентний ефект, ніж хлориди та нітрати, але менший, ніж фосфати. Співвідношення концентрацій аніонів у природних та стічних водах значно різняться і їх слід враховувати при дослідженні процесів сорбційного очищення води.

Ключові слова: очищення води, дефторування, ферумвмісні сорбенти, конкуруючі іоні.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330438

SOME ISSUES ON COMPUTER SIMULATION AND OPTIMIZATION OF SORPTION-BASED TREATMENT OF FLUORIDATED WATER

Evgeniy KOSTENKO, Arcady SHAHNOVSKY, Tetiana OBUSHENKO,
Nataliia TOLSTOPALOVA, Olga SANGINOVA, Oleksandr GRUSHEVSKYI
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: kostenko.evgeniy@lll.kpi.ua

Abstract

The problem of fluoride contamination in natural water sources has become increasingly relevant, particularly in rural areas and regions with naturally elevated fluoride levels in groundwater. The lack or military destruction of centralized water treatment infrastructure in many such areas exacerbates the health risks associated with excessive fluoride intake. These challenges highlight the need for affordable and locally adaptable solutions for decentralized water purification. The study focuses on the neural network (NN) simulation and optimization of sorption-based water treatment processes aimed at the removal of fluoride compounds using iron-containing sorbents derived from water treatment waste. For the NN approximation of the sorption capacity of the sorbent and fluoride ion removal efficiency as well as for the subsequent search for a compromise optimum (simultaneous multigoal maximization), a Python-based program was developed.

To address the multi-objective optimization problem, Harrington's desirability functions were applied. As the global optima search method, the "differential evolution" algorithm was selected. The calculated optimal point corresponds to the findings of the authors' previous studies on the influence of pH and sorbent dose on the sorption process.

Approaches presented are essential for the cost-effective adaptation of sorption technologies to local needs. The integration of statistical and AI-driven models facilitates the development of intelligent decision-support systems for water treatment, contributing to both scientific advancement and practical environmental protection.

The application of computational modeling forms a cornerstone of modern research on sorption technologies. It enhances scientific understanding, enables data-driven design, and promotes the scalable implementation of innovative, sustainable water purification solutions.

Keywords*: water treatment, defluorination, sorbents, computer modeling, neural networks, multigoal optimization, global optimum.*

In Ukraine, the problem of fluoride contamination in natural water sources has become increasingly relevant, particularly in rural areas and regions with naturally elevated fluoride levels in groundwater [1]. The lack of centralized water treatment infrastructure in many such areas exacerbates the health risks associated with excessive fluoride intake, including dental and skeletal

fluorosis. These challenges highlight the need for affordable and locally adaptable solutions for decentralized water purification.

This study is devoted to the neural network approximation and optimization of sorption-based water treatment processes – primarily for natural water – aimed at the removal of fluoride compounds using iron-containing sorbents derived from water treatment waste.

Scientific research focused on the development of granulated iron-containing sorbents synthesized from industrial and agricultural waste materials is of critical importance in this context [2]. These materials offer dual environmental benefits: (1) effective adsorption of fluoride ions from contaminated water, and (2) valorization of local waste streams, such as metallurgical by-products or agricultural residues, which are abundant in many regions of Ukraine.

The use of granulated forms enhances operational feasibility in small-scale water treatment units, allowing for improved contact efficiency, ease of handling, and potential for regeneration. This is especially important for rural communities, where infrastructure investment is limited and simplicity of use is essential.

From an ecological perspective, presented research supports circular economy principles and aligns with Ukraine's national priorities in environmental protection and sustainable development. It contributes to the reduction of hazardous pollutants, promotes waste reuse, and helps safeguard public health through low-cost, scalable water treatment technologies.

Continued investigation into such sorbents, including optimization of their physicochemical properties and production technology, as well as development of optimal technological regimes for the sorbents use, is essential for their effective implementation across fluoride-affected regions of Ukraine.

Modern environmental technologies require not only effective materials but also precise tools for modeling, prediction, and optimization of treatment processes. In the context of sorption-based water purification, including the removal of fluoride ions from natural waters, computer modeling plays a critical role in accelerating the design, evaluation, and scaling of treatment systems.

Experimentally-based statistical modeling approaches, such as response surface / design of experiments methodology, allow researchers to systematically investigate the influence of multiple process variables – such as sorbent dose, contact time, pH, and initial fluoride concentration – on sorption efficiency. These models enable the identification of optimal process conditions using a limited number of experiments, which is particularly valuable when working with novel sorbents derived from industrial or agricultural waste.

Beyond classical methods, the growing availability of computational power and data has made artificial intelligence (AI) and machine learning techniques, particularly artificial neural networks, highly effective tools for capturing the complex, nonlinear relationships governing sorption processes [3]. Neural network models offer the ability to generalize from experimental data, provide accurate predictions of sorption performance under variable conditions, and support multi-objective optimization strategies – such as maximizing fluoride removal while minimizing material consumption or environmental impact.

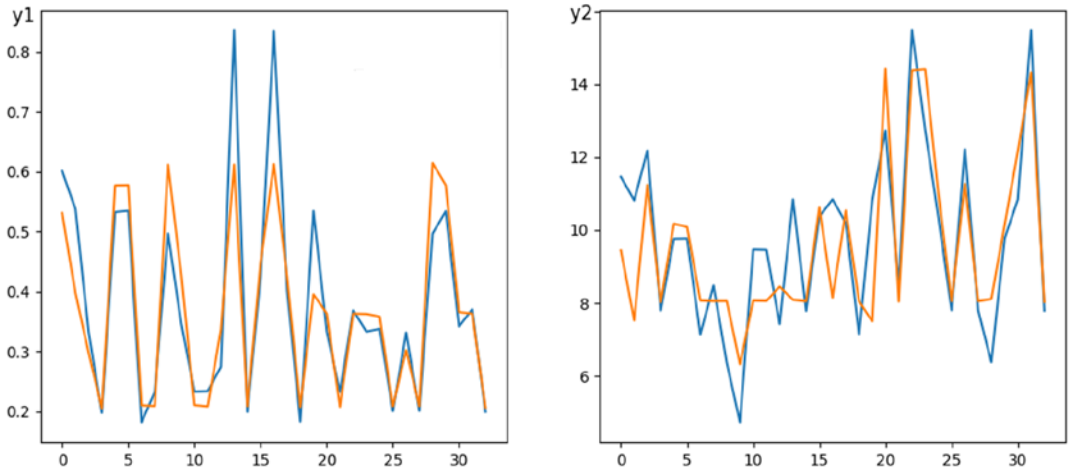
For the neural network approximation of the dependencies $y_1=f(x_1,x_2)$ – sorption capacity of the sorbent (mg/g), and $y_2=f(x_1,x_2)$ – fluoride ion removal efficiency (%), where x_1 is the sorbent dose (g), and x_2 is the pH of the medium, as well as for the subsequent search for a compromise optimum (simultaneous maximization of y_1 and y_2), a Python-based program was developed in the PyCharm environment. The components used in the implementation are described in Table 1.

Table 1. Tools used while creating the neural network modeling and optimization software

Tool	Purpose
pandas	Reading and processing tabular data (Excel)
scikit-learn	Scaling input data
numpy	Numerical operations
matplotlib / seaborn	Constructing graphs and visualizing results
tensorflow.keras	Building and training a neural network
scipy.optimize	Stochastic optimization (using the "differential evolution" method)

The program specifies the architecture of the neural network: two neurons for variables (x_1, x_2) in the input layer of the network, two neurons for variables (y_1, y_2) in the output layer of the network; the hidden layers (second and third) contain 16 and 32 neurons with a linear relay activation function (*relu*), respectively. Linear activation functions (linear) are used in the input and output layers.

The neural network model is trained on the provided output data using the Adam optimizer with the MSE (mean squared error) optimality criterion. The prediction accuracy of the model is quantitatively evaluated using the mean absolute error metrics. It is also possible to qualitatively assess the prediction accuracy of the neural network model by constructing graphs comparing the predicted and actual values (y_1, y_2) – Fig. 1.



a) b)

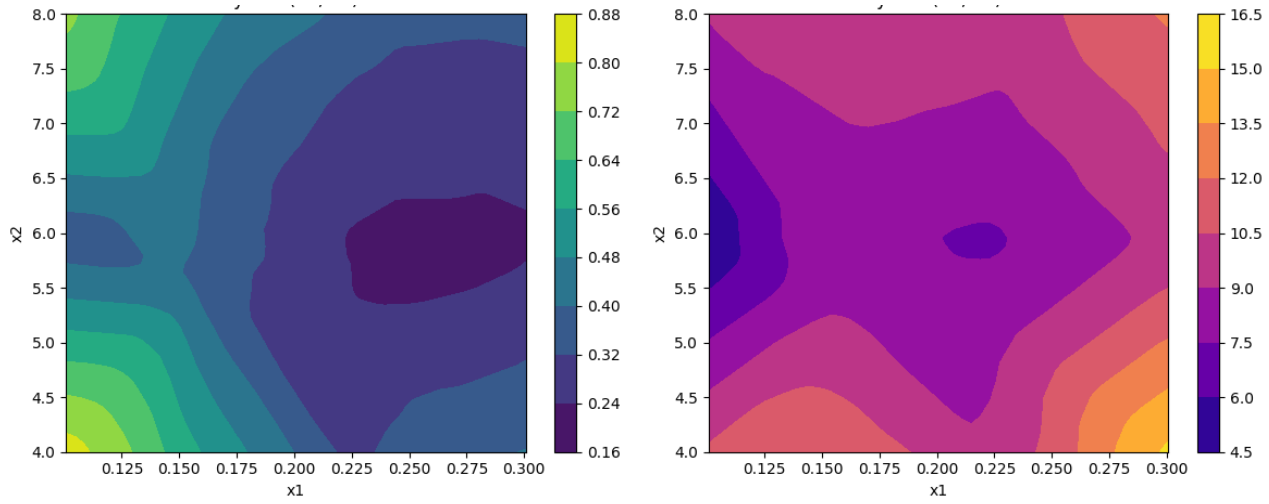
Figure 1. *An assessment of prediction accuracy using a neural network model: – actual values, – predicted values; a –y_1 (sorption capacity of the sorbent) values, b –y_2 (efficiency of fluoride ion removal) values*

As a result, adequate neural network models were obtained for both investigated responses. A graphical representation of the neural network-modeled responses is presented in Figure 2.

The obtained neural network models of the sorption process were employed to support decision-making for process optimization. This task is quite complex, as it involves solving a multi-objective optimization problem [4], requiring the simultaneous consideration of two optimality criteria: the sorption capacity of the sorbent ($max\ y_1=f(x_1, x_2)$ and the fluoride ion removal efficiency ($max\ y_2=f(x_1,x_2)$).

To address the multi-objective optimization problem, Harrington's desirability functions were applied. The resulting aggregated (composite) desirability function, obtained by combining the

individual desirability functions, reduces the problem to a single-objective optimization task. However, to reliably reach a global optimum of this criterion, it is necessary to apply specialized methods for solving multimodal optimization problems. As such a method, the stochastic "differential evolution" algorithm [5] available in the *optimize.differential_evolution* Python library (see Table 1) was selected.



a) b)

Figure 2. *Graphical representation of the neural network-modeled responses: a –y_1 (sorption capacity of the sorbent) values, b –y_2 (efficiency of fluoride ion removal) values*

The calculated compromise optimal point corresponds to the values $x_1 = 0.303$ and $x_2 = 3.981$. The corresponding predicted response values (optimality criteria) are $y_1 = 0.37$ and $y_2 = 14.77$.

The reliability of the obtained results is confirmed by their correlation with the findings of the authors' previous studies on the influence of pH and sorbent dose on the sorption process.

In conclusion, it should be noted that in the Ukrainian context, where expected post-war reconstruction and regional variability in water composition present significant challenges, such modeling approaches are essential for the cost-effective adaptation of sorption technologies to local needs. The integration of AI-driven models facilitates the development of intelligent decision-support systems for water treatment, contributing to both scientific advancement and practical environmental protection.

Consequently, the application of computational modeling (especially when combined with experimental validation) forms a cornerstone of modern research on sorption technologies. It enhances scientific understanding, enables data-driven design, and promotes the scalable implementation of innovative, sustainable water purification solutions.

The presented study was conducted within the framework of the research projects "Pollutants removal of various nature from multi-component aqueous solutions by adsorption and flotation methods" (No. 0124U002058), "Industrial Wastewater Treatment Technologies Improvement Using of Artificial Neural Networks" (No. 0124U001966), "Technological principles of minimizing the content of chlorites in drinking water after disinfection with chlorine dioxide" (No. 0125U001784), and "Computer simulation and optimization of sustainable water management technological networks" (No. 0124U002127).

References

1. Shulyak, S.; Shevchenko, L.; et. al. Quality and safety of tap water in selected regions of Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology* **2021**, *11 (2)*, 274-283. DOI: https://doi.org/10.15421/2021_111

2. Kostenko, Ye.; Obushenko, T.; Tolstopalova, N; Sanginova, O. Doslidzhennya sorbtsiyi ioniv ftoru na ferumvmisnykh sorbentakh. *Materials of the XXIII Intern. Sci. & Pract. Conf. "Ecology. Man. Society"* (December 7, 2023, Kyiv, Ukraine). **2023**. 132-134. DOI: https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2023.291507 (in Ukrainian).

3. Dantas, M. S.; Christofaro, C.; Oliveira, S. C. Artificial neural networks for performance prediction of full-scale wastewater treatment plants: a systematic review. *Water Science & Technology*. **2023**. *88 (6)*. 1447–1470. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2023.276

4. Danylkovych, A.; Lishchuk, V.; Sanginova, O.; Shakhnovsky, A. Optimization of rawhide collagen defibrillization process. *Vlákna a textile*. **2023**. *30 (3)*. 3-12. DOI: https://doi.org/10.15240/tul/008/2023-3-001

5. Storn, R.; Price, K. Differential Evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*. **1997**. 11, 341–359. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1008202821328

ДЕЯКІ ПИТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД СПОЛУК ФТОРУ

Євгеній КОСТЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
http://orcid.org/0000-0003-0872-2764

Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2963-4026

Тетяна ОБУШЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-0731-0370

Наталія ТОЛСТОПАЛОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7240-5344

Ольга САНГІНОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6378-7718

Олександр ГРУШЕВСЬКИЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0006-6830-9479

Анотація: Дослідження присвячене актуальній проблемі забруднення води фтором. Відсутність (зокрема, внаслідок військових дій) в деяких районах централізованої інфраструктури очищення води посилює ризики для здоров'я, пов'язані з надмірним споживанням фтору, що вказує на необхідність доступних та локально адаптованих рішень для децентралізованого очищення води від сполук фтору. Представлено результати комп'ютерного моделювання із використанням нейронних мереж (НМ) та оптимізації сорбційних процесів очищення води задля видалення сполук фтору. Досліджувалися залізовмісні сорбенти, отримані з відходів водоочищення. Для нейромережевого наближення ключових характеристик якості сорбентів (сорбційної ємності та ефективності видалення фторид-іонів), а також для подальшого пошуку компромісного оптимуму (одночасної багатоцільової максимізації) було розроблено програму на основі Python. Для вирішення задачі багатоцільової оптимізації було застосовано підхід на основі функції бажаності Харрінгтона, для пошуку глобального оптимуму задачі оптимізації обрано алгоритм «диференціальної еволюції». Розрахована компромісна оптимальна точка відповідає результатам попередніх досліджень авторів щодо впливу умов проведення процесу на процес сорбції. Використання моделей, заснованих на штучному інтелекті, сприяє розробці інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень щодо створення та модернізації систем водоочищення, сприяючи як науковому прогресу, так і практичному захисту навколишнього середовища. Застосування комп'ютерного моделювання є основою сучасних досліджень сорбційних технологій. Воно покращує наукове розуміння, дозволяє проводити проектування на основі даних та сприяє масштабованому впровадженню інноваційних, стійких рішень для очищення води.

Ключові слова: очищення води, дефторування, сорбенти, комп'ютерне моделювання, нейронні мережі, багатокритеріальна оптимізація, глобальний оптимум.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2025.330316

MATHEMATICAL MODULAR MODELING METHODS FOR SIMULATING MATERIAL – ENVIRONMENT INTERACTIONS (MEI)

Andrejs KRAUKLIS
Latvia University of Life Sciences and Technologies,
MEI Core Group
Akadēmijas Street 19, Jelgava, LV-3001, Latvia
e-mail: andrejs.krauklis@lbtu.lv

Abstract

Material-environment interactions (MEI) significantly impact the durability and performance of various engineered materials, creating uncertainties that complicate the prediction of their service lifetimes, as well as affect the environment by the release of chemicals and ions. The duality of lifetime prediction lies in the definitions of failure criteria and end-of-life scenarios. Similar modeling methodologies can be applied, whether prioritizing "safety," "decomposition" of the material, or environmental pollution. Conventional experimental approaches are costly and time-consuming, presenting a substantial hurdle to innovation. Mathematical modeling methods offer a cost-effective and efficient alternative by combining accelerated testing data and simulations based on fundamental scientific principles of MEI. This paper presents a modular and multiscale modeling framework, illustrating how environmental factors such as chemical composition, temperature, acidity, and mechanical stresses influence material degradation. This framework, applicable to a wide variety of materials and environments, provides essential tools for predicting service lifetimes, contributing to both academia and industrial applications.

Keywords: *mathematical modeling methods, environment, modular methods, multiscale modeling, material-environment interactions.*

1. Introduction

Materials interact continuously with their environments, leading not only to their gradual degradation and eventual failure but also to environmental pollution through chemical and ionic releases. Traditional experimental approaches, involving extensive long-term testing, are costly and time-intensive, restricting the rapid assessment and innovation in materials design. Thus, reliable, accurate, and economically viable MEI modeling methods are urgently required to better predict both material lifespan and environmental impacts [1].

This paper proposes a modular, multiscale modeling framework based on fundamental physical and chemical principles. The framework incorporates accelerated testing and predictive modeling, bridging short-term data with long-term predictions, facilitating cost reduction, and streamlining the innovation process. Given the multicomponent nature of many engineered materials, the approach

also considers each component individually, addressing their unique interaction pathways and environmental consequences [2]. The multiscale nature of MEI simulations is shown in Figure 1.

2. Methods

2.1. Modular Concept

The modular modeling framework integrates processes across multiple scales, from atomic-level chemical interactions to macroscopic responses. Each module is developed separately, addressing specific degradation mechanisms such as chemical reactions, diffusion, and mechanical stress-induced failures. The modular approach also explicitly accounts for chemical releases into the environment, thus enabling comprehensive lifetime predictions from both safety and environmental perspectives [4]. The modular approach (as an example for composite materials) is schematically shown in Figure 2. The methodology of the "red" (meaning theoreticized) quantitative structure-property relationship (QSPR) module was recently developed and described in [5].

2.2. MEI Simulations of Matrix Constituents

Matrix materials commonly undergo degradation through various mechanisms such as hydrolysis, and oxidation. The modeling methods employed here incorporate degradation rate kinetics, empirical correlations, and advanced simulations to capture these complex processes accurately. Diffusion-driven processes such as moisture absorption and chemical leaching are modeled using advanced diffusion equations, enabling assessment of both the structural integrity loss and the environmental impact due to chemical releases.

Quantitative Structure-Property Relationship (QSPR) modeling is particularly highlighted for its ability to correlate molecular properties with macroscale performance, bridging molecular interactions and large-scale structural responses effectively [6].

2.3. MEI Simulations of Reinforcing Constituents

Reinforcing elements, including fibers and particulates, exhibit diverse environmental degradation pathways such as chemical dissolution, corrosion, and stress-corrosion cracking. Predictive kinetic models and micromechanical approaches quantify the degradation rates and associated chemical emissions. These models facilitate predictions concerning both mechanical performance deterioration and potential environmental pollution resulting from constituent breakdown.

Advanced analytical tools are employed to evaluate interactions at the microstructural level, further linking these micro-level changes to macro-scale material behaviors and environmental impact scenarios.

An analytical toolbox consisting of seven modeling modules was presented in a recent work (2021) on the Modular Paradigm for composite GFRPs [7]. The seven developed modules of the Reinforcement Modular Group within the Modular Paradigm are shown in Figure 3.

Models that predict mass loss and radius reduction are the Contracting Cylinder model [8], the Shrinking Cylinder model [9] and the Dissolving Cylinder Zero-Order Kinetic (DCZOK) model [10].

The crack growth evolution can be modelled by micromechanical models [11]. The link between the dissolution kinetics (DCZOK model) and the hydrolytic crack growth is described in [12].

As shown in Figure 2, modules are divided in four sections that relate to the overall composite configuration and modeling of environmental degradation of individual micro-constituents (polymer, fibers and interphase).

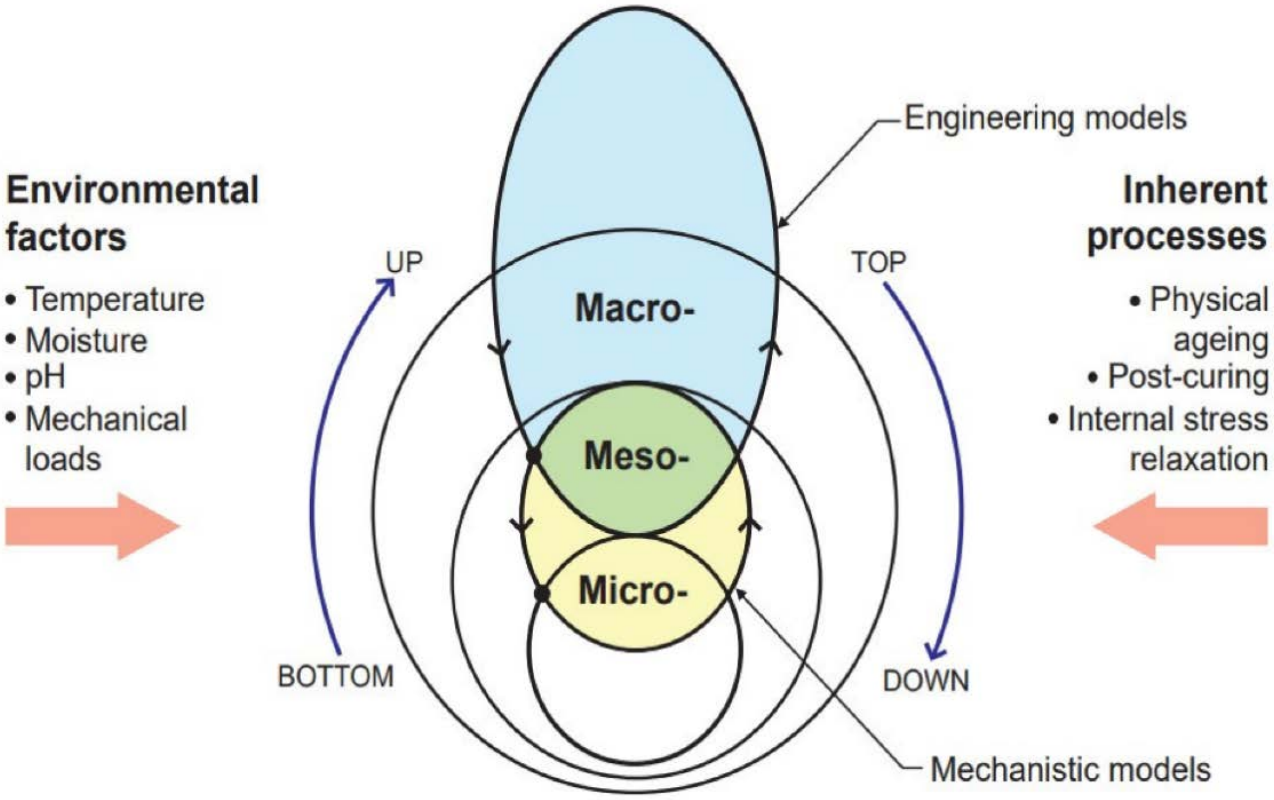


Figure 1. *Multitude of scales involved in MEI Modeling [3]*

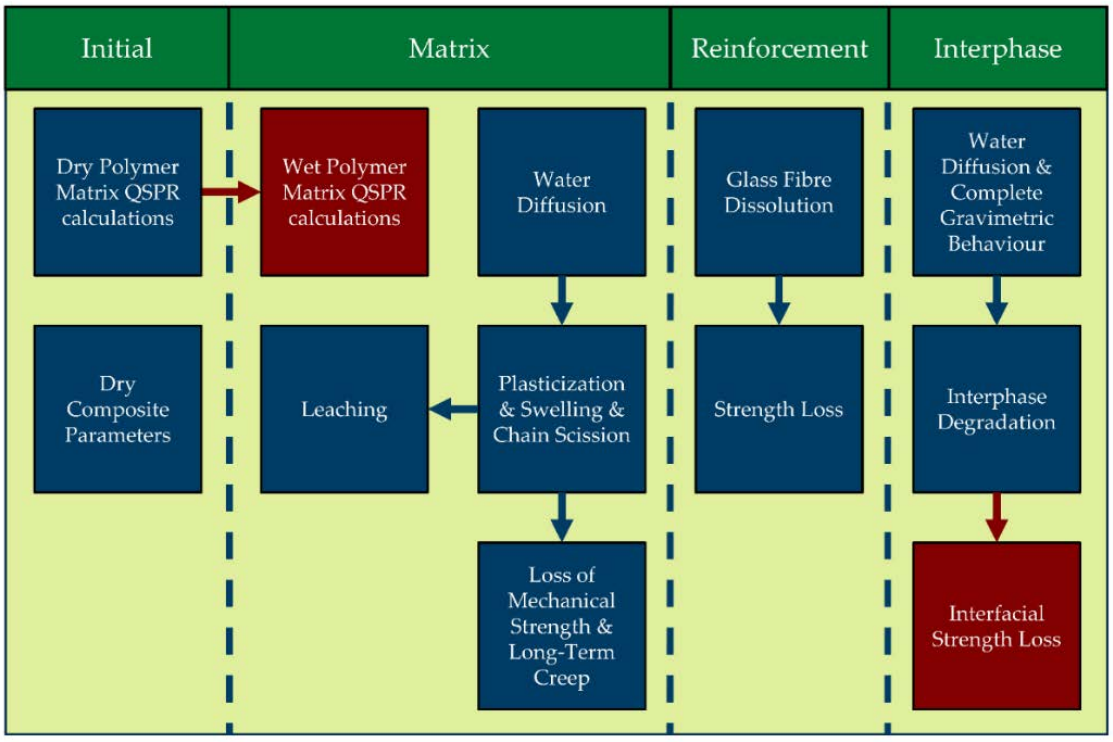


Figure 2. *Modular MEI framework for composite materials [6]*

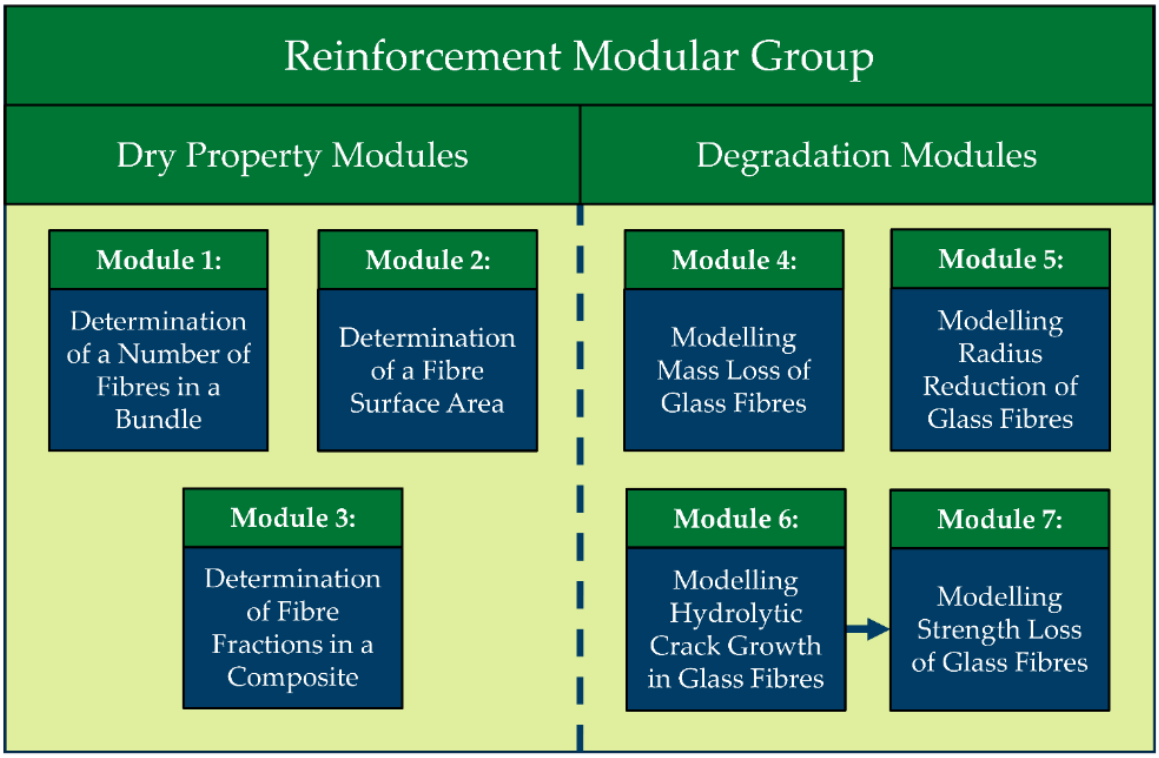


Figure 3. *The seven modules for Reinforcement within the Modular Modeling Concept [7]*

2.4. MEI Simulations of Interphase Constituents

Interphase degradation between the reinforcement and matrix phases significantly affects both structural integrity and the potential for environmental contamination through chemical release. Mass balance and kinetic modeling approaches characterize the degradation processes, enabling accurate predictions of both mechanical property loss and chemical leaching [13-15].

Improved models linking interphase degradation to global structural and environmental impacts are still evolving and represent a critical area for further research to enhance predictive capabilities comprehensively [13-15].

3. Discussion

The predictive modeling of material lifetimes involves clearly defining failure criteria and end-of-life scenarios, which directly impacts both safety management and environmental considerations. Similar degradation processes and modeling techniques apply irrespective of whether the primary objective is structural reliability or minimizing environmental pollution.

Future improvements should focus on enhancing the precision of individual modeling modules, expanding the integration of modules, and explicitly incorporating environmental release and pollution metrics into lifetime prediction models.

4. Conclusions

The presented modular and multiscale mathematical modeling framework effectively predicts material-environment interactions (MEI) and advances multiscale modelling frameworks by connecting molecular degradation processes to macroscopic mechanical behaviour, encompassing both structural integrity and environmental impacts.

The modular design of this framework allows for the integration of additional experimental and computational tools, enhancing its versatility for different material systems and aging conditions.

The methodology significantly reduces reliance on extensive physical testing, thereby enabling efficient and accurate lifetime and pollution predictions. By offering on-site, non-destructive solution for structural health monitoring, this methodology has broad potential applications across various industries. By offering on-site, non-destructive solution for structural health monitoring, this methodology has broad potential applications across various industries.

This approach supports sustainable material design and enhances reliability predictions, significantly benefiting both academia and industry.

Acknowledgments: The author acknowledges TEN4 funding. Andrey is especially grateful to Oksana for her support.

References

1. A. E. Krauklis. *Environmental Aging of Constituent Materials in Fiber-Reinforced Polymer Composites*. Ph.D. Thesis, NTNU, Trondheim, 2019.
2. A. E. Krauklis, C. W. Karl, I. B. C. M. Rocha, J. Burlakovs, R. Ozola-Davidane, A. I. Gagani, and O. Starkova. Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites—Modular and Multiscale Methods. *Polymers*, 14:216-259, 2022.
3. O. Starkova, A. I. Gagani, C. W. Karl, I. B. C. M. Rocha, J. Burlakovs, and A. E. Krauklis. Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites—Durability Prediction Methods. *Polymers*, 14:907-942, 2022.
4. A. T. Echtermeyer, A. I. Gagani, A. E. Krauklis and T. Mazan. Multiscale Modelling of Environmental Degradation—First Steps. In Durability of Composites in a Marine Environment, vol 2, pages 135-149, Springer, Berlin, 2018.
5. E. Krauklis, F. Verceux, S. Grammatikos. Rapid Non-Destructive Polymer Degradation Degree Evaluation Method Using Quantitative Structure-Property Relationship. *Mechanics of Composite Materials*, 2025 (*accepted for publication*).
6. A. E. Krauklis. Environmental Durability of Composite Materials: Analytical Modelling Toolbox. In *Proceedings of the Aachen Reinforced! Symposium*, Aachen, pages 62–70, 2021.
7. A. E. Krauklis. Modular Paradigm for Composites: Modeling Hydrothermal Degradation of Glass Fibers. *Fibers* 9, 83-94, 2021.
8. A. Khawam and D. R. Flanagan. Solid-State Kinetic Models: Basics and Mathematical Fundamentals. *J. Phys. Chem. B* 110, 17315–17328, 2006.
9. S. T. Bashir, L. Yang, J. J. Liggat and J. L. Thomason. Kinetics of dissolution of glass fiber in hot alkaline solution. *J. Mater. Sci.* 53, 1710–1722, 2018.
10. A. E. Krauklis and A. T. Echtermeyer. Long-Term Dissolution of Glass Fibers in Water Described by Dissolving Cylinder Zero-Order Kinetic Model: Mass Loss and Radius Reduction. *Open Chem.* 16, 1189–1199, 2018.
11. H. Sekine and P. W. Beaumont. A physically based micromechanical theory of macroscopic stress-corrosion cracking in aligned continuous glass-fibre-reinforced polymer laminates. *Compos. Sci. Technol.* 58, 1659–1665, 1998.
12. A. T. Echtermeyer, A. E. Krauklis, A. I. Gagani, and E. Sæter. Zero Stress Aging of Glass and Carbon Fibers in Water and Oil—Strength Reduction Explained by Dissolution Kinetics. *Fibers* 7, 107-120, 2019.
13. A. E. Krauklis, O. Starkova, D. Gibhardt, G. Kalinka, H. A. Aouissi, J. Burlakovs, A. Sabalina and B. Fiedler. Reversible and irreversible effects on the epoxy GFRP fiber-matrix interphase due to hydrothermal aging. *Composites Part C: Open Access* 12, 100395-100403, 2023.

14. A. E. Krauklis, A. I. Gagani and A. T. Echtermeyer. Long-Term Hydrolytic Degradation of the Sizing-Rich Composite Interphase. Coatings 9, 263-286, 2019.

15. R. Plonka, E. Mäder, S. Gao, C. Bellmann, V. Dutschk and S. Zhandarov. Adhesion of epoxy/glass fibre composites influenced by aging effects on sizings. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 35, 1207–1216, 2004.

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ МОДУЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ДОВКІЛЛЯМ

Андрейс КРАУКЛІС
Латвійський університет наук про життя і технологій
Akadēmijas Street 19, Jelgava, LV-3001, Латвія
https://orcid.org/0000-0003-2380-4450

Анотація

Взаємодія матеріалів із довкіллям суттєво впливає на довговічність і експлуатаційні характеристики різних інженерних матеріалів, створюючи невизначеності, які ускладнюють прогнозування їхнього строку служби, а також спричиняючи забруднення довкілля через виділення хімічних речовин та іонів. Подвійність у прогнозуванні строку служби полягає у визначенні критеріїв відмови та сценаріїв завершення експлуатації. Схожі методи моделювання можуть бути застосовані незалежно від того, що ставиться в пріоритет — «безпека», «розклад» матеріалу чи забруднення довкілля. Традиційні експериментальні підходи є затратними за часом і коштами, що створює значні перешкоди для впровадження інновацій. Натомість математичні методи моделювання пропонують економічно вигідну та ефективну альтернативу, поєднуючи дані прискорених випробувань із симуляціями, заснованими на фундаментальних наукових принципах моделювання взаємодії. У цій роботі представлено модульний багатомасштабний підхід до моделювання, який ілюструє, як чинники довкілля — хімічний склад, температура, кислотність і механічні навантаження — впливають на деградацію матеріалів. Цей підхід, що застосовується до широкого спектра матеріалів і середовищ, забезпечує важливі інструменти для прогнозування строків служби, сприяючи як академічним дослідженням, так і промисловому використанню.

Ключові слова: *методи математичного моделювання, навколишнє середовище, модульні методи, багатофакторне моделювання, взаємодія матеріал-середовище.*

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330289

ОТРИМАННЯ СПОЛУК ОКИСЛЕНОГО ХЛОРУ ІЗ РОЗЧИНІВ ХЛОРИДУ НАТРІЮ ЕЛЕКТРОДІАЛІЗОМ

Яна КРИЖАНОВСЬКА, Микола ГОМЕЛЯ, Дарина ДУДКА
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: *yanamart93@ukr.net*

Анотація

Дана робота присвячена дослідженню процесів переробки розчинів хлориду натрію, близьких за складом до концентратів зворотньоосмотичного знесолення води, методом електродіалізу. При проведенні електролізу розчинів використовували відкриті двокамерні електролізери. Розчини з хлоридами натрію поміщали в анодну камеру, а катодну камеру наповнювали розчинами лугу концентрацією 200-1000 мг-екв/дм^3. Електроліз у відкритому двокамерному електролізері проводили при використанні розчинів хлориду натрію з концентрацією хлоридів від 60 до 1725 мг-екв/дм^3. В даному випадку, використовували аніонообмінну мембрану МА-41. Катод був виготовлений із легованої сталі 12Х18Н10Т, анод – із титанової пластини, покритої оксидом рутенію. Площа електродів $S_a = S_k = 12$ см^2. Катодну камеру заповнювали 0,2 Н розчином NaOH; анодну область – робочим розчином хлориду натрію. При заданій силі струму процес електролізу проводили 2-8 годин, контролюючи періодично лужність в католіті, вміст хлоридів та активного хлору в аноліті.

Ключові слова: *електроліз, електрохімічне очищення, окислення, хлорид натрію, активних хлор, гіпохлорит натрію, мембрана.*

В значній мірі причини підвищення рівня мінералізації поверхневих вод на Україні мають техногенний характер. Застарілі технології водопідготовки та очищення стічних вод минулого століття непридатні для вилучення з води розчинних речовин. Невирішеною є проблема утилізації концентратів зворотньоосмотичного опріснення води, відходів іонообмінного її знесолення. Це суттєво обмежує застосування сучасних методів демінералізації води[1-4]. При цьому постійно загострюється проблема опріснення мінералізованих артезіанських, поверхневих та шахтних вод. Значна частина шахтних вод, придатних для використання, через проблему утилізації концентратів не використовується, а скидається у довкілля після розведення, або, навіть, без розведення та очищення [5-7]. Це також значно обмежує використання артезіанських і поверхневих вод з підвищеною мінералізацією.

Метою роботи було визначенням ефективності процесів синтезу гіпохлориту натрію та інших сполук окисленого хлору із розчинів хлориду натрію близьких за складом до концентратів мембранного очищення води, або інших стічних вод методом електродіалізу у

відкритих двокамерних елетролізерах в залежності від характеристик води та параметрів процесу.

Для окислення хлоридів на першому етапі досліджень використовували відкриті двокамерні електролізери з аніонною мембраною МА-41. Застосування такої мембрани захищає катод від отруєння іонами жорсткості. Крім того, дана мембрана пропускає гідроксид-аніони з катодної камери, забезпечуючи підтримання нейтрального середовища в аніоніті, зв'язування активного хлору та диоксиду хлору. Результати по окисленню розчинів хлориду натрію концентрацією 60 мг-екв/дм^3 представлені на рисунку 1 та 2.

З рис. 1 та 2 видно, що інтенсивність окислення хлоридів зростає із підвищенням анодної щільності струму. Особливістю процесу є те, що при щільності струму 0,83 та 1,67 А/дм^3 спостерігається підвищення концентрації окислених сполук хлору до 75-85 мг-екв/дм^3. При анодній щільності струму 4,17 А/дм^2 спостерігається підвищення концентрації окислених сполук хлору до 65 мг-екв/дм^3, а потім її зниження до 50 мг-екв/дм^3. Подібну залежність спостерігали і при щільності струму 8,33 а/дм^2. При цьому за 30 хвилин концентрація окислених сполук хлору сягала 115 мг-екв/дм^3, а потім знизилась до 70 мг-екв/дм^3 при часі електролізу 60 хв. Цікавою є залежність між кількістю сполук окисленого хлору і кількістю відновлених хлоридів.

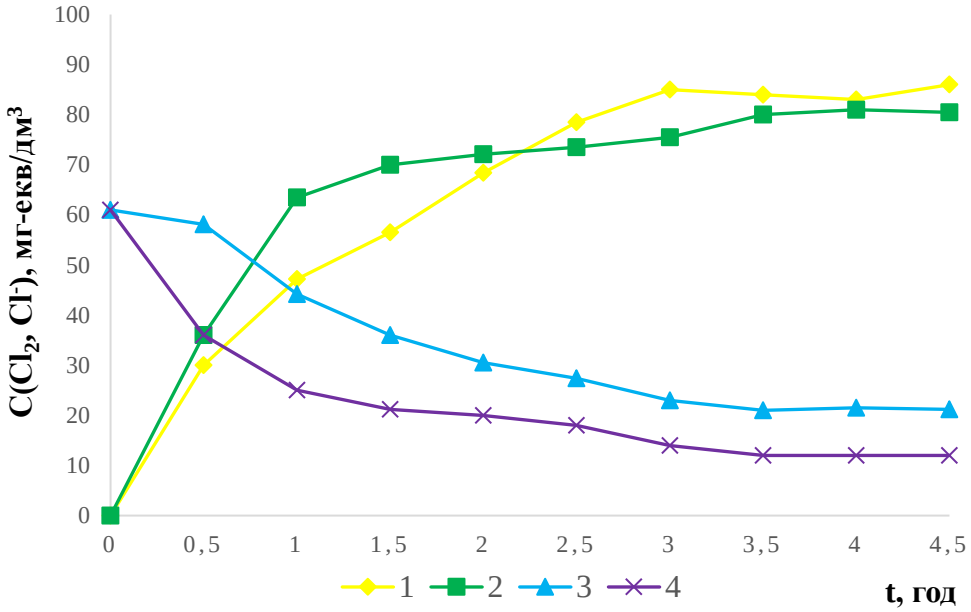


Рис. 1 . *Залежність концентрації сполук окисленого хлору (1; 2) та хлоридів (3; 4) від часу електролізу при щільності струму А/дм^2: 0,83 (1; 3) та 1,67 (2; 4) в анодній камері двокамерного електролізера (мембрана МА-41) при концентрації хлоридів в анодній камері 61 мг-екв/дм^3 та лужності в катодній камері 200 мг-екв/дм^3*

Так при щільності струму 0,83 А/дм^2 (рис.1) при зниженні концентрації хлоридів на 40 мг-екв/дм^3, концентрація сполук окисленого хлору зросла до 86 мг-екв/дм^3. При щільності струму 1,67 мг-екв/дм^3 ці показники були на рівні 49 мг-екв/дм^3 та 80,5 мг-екв/дм^3.

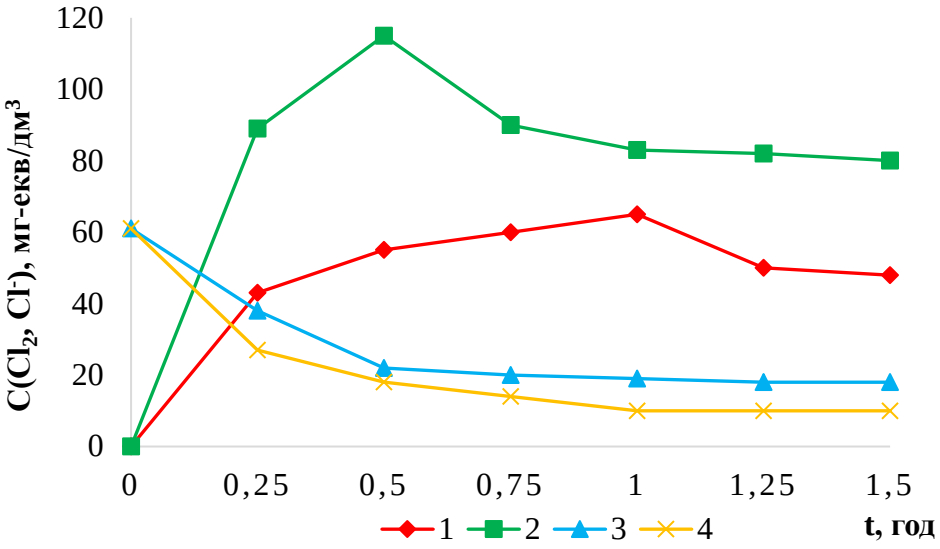


Рис. 2. *Зміна концентрації сполук окисленого хлору (1 ;2), хлоридів (3; 4) в анодній камері двокамерного електролізера (мембрана-МА-41) з часом електролізу при концентрації хлоридів в анодній камері 61 мг-екв/дм^3, лужності католіту 200 мг-екв/дм^3, при анодній щільності струму, А/дм^2 : 4,17 (1; 3) та 8,33 (2; 4)*

При щільності струму 4,17 А/дм^2 (рис.2) при зниженні концентрації хлоридів на 39 мг-екв/дм^3 концентрація сполук окисленого хлору зросла до 60 мг-екв/дм^3, а при щільності струму 8,33 А/дм^3 при зниженні концентрації хлоридів на 38 мг-екв/дм^3 концентрація сполук окисленого хлору зросла до 115 мг-екв/дм^3.

Отже, в результаті проведеної роботи можемо стверджувати, що у процесі електролізу розчинів хлориду натрію у відкритих двокамерних електролізерах з аніонною мембраною МА-41 наряду звільним хлором утворюються інші сполуки окисленого хлору. Це видно по значному перевищенням кількості продуктів окисленого хлору в аноліті над кількістю окислених хлоридів.

Література

1. Рисухін В.В., Переробка концентратів, що утворюються при нанофільтраційному очищенні вод з підвищеною мінералізацією / В.В. Рисухін, Т.О. Шаблій, М.Д. Гомеля // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011.Т.5. - №3 (53) – С. 51-55.
2. Макаренко І.М., Іонообмінне знесолення та пом'якшення вод із підвищеними рівнями мінералізації та жорсткості / І.М. Макаренко, І.М. Трус, В.М. Грабітченко // Праці Одеського політехнічного університету. – 2014. – № 1 (43) . – С. 235-241.
3. Буртна І.А., Огляд мембранних технологій очищення води у водопостачанні та водопідготовці / І.А. Буртна, Д.В. Литвиненко // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2012. - 6.10 (60). - с. 4-6.
4. Благополучна А., Застосування економічної оцінки мембранних технологій для очищення стічних вод / А. Благополучна, В. Парахненко, Н. Ляховська // Економічні горизонти. – 2022. - (2(20). - С. 33–41.
5. Балакіна М.М., Електродіаліз у комплексній переробці фільтратів полігонів твердих побутових відходів / М.М. Балакіна // Хімія та технологія води. - 2015. – 37. - № 4. - С. 331-341.

6. Ляшенко Є.В., Процеси очищення води. Кріознесолення /Є.В.Ляшенко, Т.А. Біла, О.В. Охріменко // Таврійський науковий вісник. - №97. - С. 236-243. - 2017.
7. Естефане П. Х., Дослідження тепло та масообміну при водовипарному концентруванні розсолу / П.Х. Естефане, В. Ф. Райка, М. А. Цейтлін // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2007.- №5/4(21). - с. 40-44.

OBTAINING OXIDIZED CHLORINE COMPOUNDS FROM SODIUM CHLORIDE SOLUTIONS BY ELECTRODIALYSIS

Yana KRYZHANOVSKA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-9747-969X

Mykola GOMELYA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1165-7545

Daryna DUDKA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0009-0390-0438

Abstract

This work is devoted to the study of the processes of processing sodium chloride solutions, close in composition to reverse osmosis water desalination concentrates, by the electrodialysis method. When conducting electrolysis of solutions, open two-chamber electrolyzers were used. Solutions with sodium chlorides were placed in the anode chamber, and the cathode chamber was filled with alkali solutions with a concentration of 200-1000 mg-eq/dm^3. Electrolysis in an open two-chamber electrolyzer was carried out using sodium chloride solutions with a chloride concentration from 60 to 1725 mg-eq/dm^3. In this case, an anion exchange membrane MA-41 was used. The cathode was made of alloyed steel 12X18H10T, the anode was made of a titanium plate coated with ruthenium oxide. The area of the electrodes Sa = Sk = 12 cm^2. The cathode chamber was filled with 0.2 N NaOH solution; the anode region – with a working solution of sodium chloride. At a given current strength, the electrolysis process was carried out for 2-8 hours, periodically monitoring the alkalinity in the catholyte, the content of chlorides and active chlorine in the anolyte.

Keywords: electrolysis, electrochemical purification, oxidation, sodium chloride, active chlorine, sodium hypochlorite, membrane

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332167

ANALYSIS OF AIR POLLUTION DYNAMICS IN KYIV UNDER MARTIAL LAW CONDITIONS (2023)

Olga LEGOTINA, Viacheslav HNATIUK
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: viacheslavhnatiuk@gmail.com

Abstract

The level of atmospheric pollution depends not only on the volume of emissions but also on meteorological conditions such as wind direction and speed, temperature inversions, solar radiation, and precipitation. These factors influence the dispersion, movement, and transformation of air pollutants, causing spatial and temporal fluctuations in the concentration of harmful substances. The terrain and urban planning also play a significant role. Even with identical emission levels, air pollution can vary severalfold depending on weather conditions. Therefore, effective efforts to combat air pollution require consideration of the region's climatic and geographical characteristics, as well as systematic monitoring and forecasting.

Keywords

Air Pollution Index (API), Nitrogen Dioxide (NO_2), Formaldehyde, Sulfur Dioxide (SO_2), Phenol, Air Monitoring, Environmental Situation, Maximum Permissible Concentrations (MPC), Seasonal Dynamics.

Objective

The aim of this study is to analyze the dynamics of atmospheric pollution in the city of Kyiv in 2023 under martial law conditions. Particular attention is given to assessing the levels of major and specific air pollutants, identifying seasonal variations in their concentrations, mapping the spatial distribution of environmental pressure, and detecting the most problematic areas of the capital. The study seeks to provide a well-founded overview of the city's atmospheric environmental state in order to support future risk forecasting for public health and to improve air protection measures.

Scientific Novelty

For the first time under the conditions of full-scale military aggression, a systematic analysis of the state of atmospheric air in the city of Kyiv was conducted, taking into account the limited access to official statistics. The study is based on large-scale monitoring data encompassing over 80,000 samples from 16 stationary observation posts, which enabled the identification of spatial and seasonal patterns in the distribution of major and specific pollutants.

The novelty lies in the detection of stable local zones with the highest pollution levels (such as Demiivska Square and central transport hubs) and in the comparison of Air Pollution Index (API)

indicators over time with previous years. Special attention is paid to the impact of martial law on the city's environmental situation, particularly changes in the structure of pollution sources, seasonal fluctuations, and the behavior of photochemically active compounds.

The results of the study provide a detailed ecological profile of Kyiv for the year 2023 and serve as a basis for further modeling of health risks and the development of adaptive environmental protection measures under crisis conditions.

Essence of the Study

Against the backdrop of ongoing military aggression by the Russian Federation and the introduction of martial law in Ukraine, the publication of official statistics in many areas—including environmental monitoring—has been significantly restricted. Nevertheless, atmospheric air monitoring in the capital continued to be carried out by the Borys Sreznevskyi Central Geophysical Observatory. In 2023, air sampling was conducted at 16 stationary observation posts located across eight districts of the city, with over 81,000 samples analyzed in total.

The monitoring covered both primary and specific air pollutants, including suspended particles, sulfur dioxide, nitrogen monoxide and dioxide, formaldehyde, phenol, and heavy metals. Throughout the year, the maximum permissible concentrations (MPC) for many of these substances were consistently exceeded. On average, nitrogen dioxide exceeded its daily MPC by a factor of 2.3, formaldehyde by 1.4, sulfur dioxide by 1.5, and phenol by 1.2.

The most critical pollution levels were recorded in areas with high traffic density and developed infrastructure—such as Demiivska Square, Dovzhenko Street, Sklyarenka Street, Kaunaska Street, as well as Bessarabska and Halytska Squares. These zones consistently showed the highest concentrations of harmful substances. In contrast, the lowest levels of pollution were recorded in a relatively favorable ecological area along Nauky Avenue.

Seasonal pollution dynamics clearly reflected the link between the heating season and elevated sulfur dioxide levels, as well as between the summer months and increased concentrations of formaldehyde and phenol—substances formed through photochemical reactions.

According to the Air Pollution Index (API), the level of air pollution in Kyiv in 2023 remained high, with peak values recorded in May–June (reaching up to 10.0 conventional units). Only during October to December was a slight decrease observed, lowering pollution levels into the "elevated" category.

Compared to 2022, the overall Air Pollution Index (API) remained virtually unchanged (7.7 versus 7.6 conventional units), although some changes in the structure of pollutants were observed: a slight decrease in nitrogen dioxide, nitrogen monoxide, and formaldehyde levels was recorded. At the same time, the concentration of sulfur dioxide increased significantly.

Thus, the year 2023 confirmed the persistence of high levels of atmospheric air pollution in the capital, particularly in areas with heavy traffic and dense urban development. Issues of systematic monitoring, adaptation of urban infrastructure, and strengthening of air quality protection measures remain pressing under the conditions of wartime.

Conclusions

In 2023, the level of atmospheric pollution in Kyiv remained consistently high, as confirmed by the Air Pollution Index (API), which fluctuated throughout the year between 7.0 and 10.0 conventional units, with peak values recorded in May–June. The primary air pollutants remained nitrogen dioxide, formaldehyde, sulfur dioxide, phenol, and nitrogen monoxide—classified as hazard classes II and III—which regularly exceeded maximum permissible concentrations (MPCs).

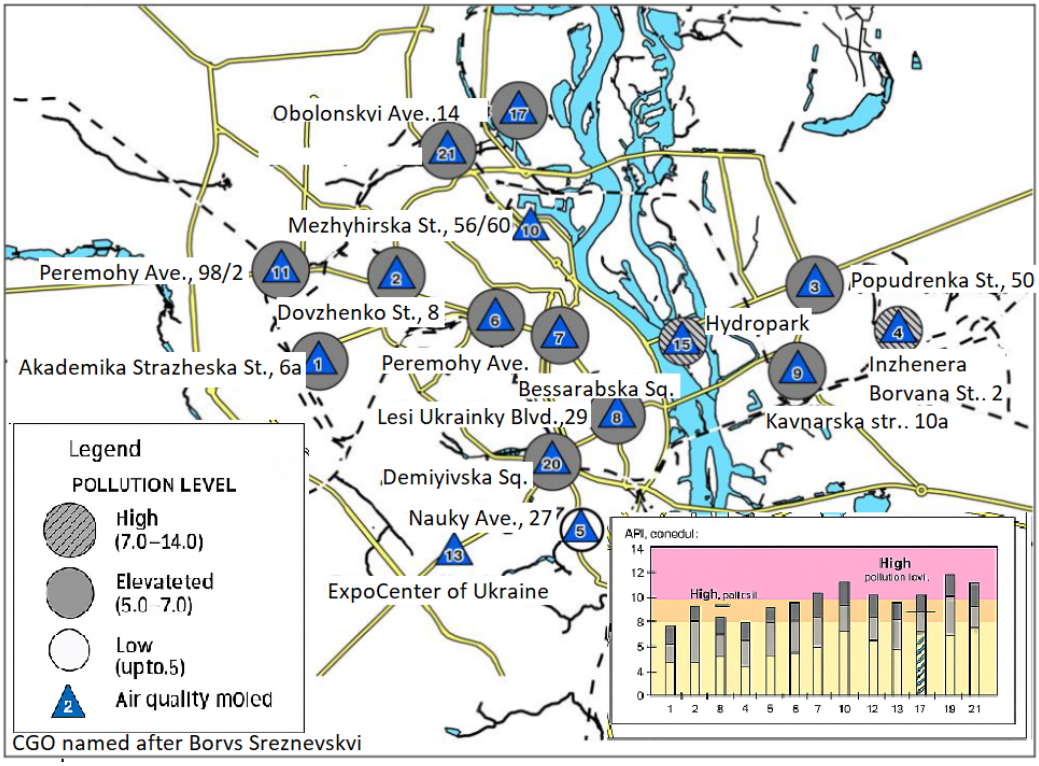


Fig.1. *Map of the Monitoring Network Observation Stations of the Borys Sreznevskyi Observatory in Kyiv*

The highest levels of pollution were recorded in areas with heavy traffic: Demiivska Square, Bessarabska and Halytska Squares, Beresteiskyi Avenue, and Sklyarenka, Dovzhenka, and Kaunaska Streets. The lowest levels were observed in the green zone along Nauky Avenue.

Seasonal trends in pollutant concentrations indicate the influence of the heating season (with elevated SO_2 levels in winter) and photochemical processes (increased formaldehyde and phenol in summer). Compared to 2022, there was no significant improvement in the environmental situation. A slight decrease in the average annual concentrations of some substances (nitrogen dioxide, formaldehyde) was accompanied by a notable increase in sulfur dioxide levels. The concentrations of specific pollutants—ammonia, hydrogen sulfide, hydrogen fluoride and chloride, as well as heavy metals—did not exceed the permissible limits, but their presence in the air requires ongoing monitoring.

The results underscore the need to strengthen environmental monitoring measures, especially under martial law, and to implement adaptive air quality management policies in the urban environment.

References

1. "Urban Meteorological Aspects of Air Pollution in a Large City," S.I. Snizhko, O.H. Shevchenko, Kyiv, 2011.
2. Guidelines for Air Pollution Control, RD 52.04-186-89.
3. Ecological Passport of the City of Kyiv for 2023.
4. Materials from the website of the Borys Sreznevskyi Central Geophysical Observatory: http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/

5. Materials from the website of the State Environmental Inspectorate of Ukraine: https://www.dei.gov.ua/

6. "Remotely Visible Impacts on Air Quality After a Year-Round Full-Scale Russian Invasion of Ukraine," M. Savenets, V. Osadchyi, K. Komysar, N. Zhemera, A. Oreshchenko, Atmospheric Pollution Research, 2023. https://doi.org/10.1016/j.apr.2023

7. "War and Ecology: Why Nature Becomes a Victim of Armed Conflict," https://iaa.org.ua/articles/vijna-ta-ekologiya-chomu-pryroda-staye-zhertvoyu-zbrojnogo-konfliktu/

8. Draft Strategy for the Development of the City of Kyiv until 2023, https://dei-2023.kyivcity.gov.ua/

9. "Kyiv Agglomeration: What It Is and Why It Has Become Even More Important During the War," https://www.village.com.ua/

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ У МІСТІ КИЄВІ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ (2023 РІК)

Ольга ЛЕГОТІНА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна

В'ячеслав ГНАТЮК
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0000-0709-0246.

Анотація

Рівень забруднення атмосфери залежить не лише від обсягів викидів, а й від метеорологічних умов, таких як напрям і швидкість вітру, температурні інверсії, сонячна радіація та опади. Ці чинники впливають на розсіювання, переміщення й трансформацію домішок у повітрі, зумовлюючи просторово-часові коливання концентрацій шкідливих речовин. Важливу роль також відіграє рельєф місцевості та міське планування. Навіть за однакових викидів рівень забруднення повітря може відрізнятися в кілька разів залежно від погодних умов. Тому ефективна боротьба з атмосферним забрудненням потребує врахування кліматичних і географічних особливостей регіону, а також системного моніторингу та прогнозування.

Ключові слова: індекс забруднення атмосфери (ІЗА), діоксид азоту, формальдегід, діоксид сірки, фенол, моніторинг повітря, екологічна ситуація, гранично допустимі концентрації (ГДК), сезонна динаміка.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329939

ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ІЗ СТЕБЕЛ АМАРАНТУ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ПАПЕРУ І КАРТОНУ

Григорій ЛИЗАК, Даніїл ДРАГАН, Валерій БАРБАШ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: lizakgrisa210@gmail.com

Анотація

Проаналізовано технології переробки твердих відходів рослинної сировини на прикладі стебел амаранту у целюлозу і наноцелюлозу та використання наноцелюлози у виробництві паперу і картону. Показано, що використання двостадійної термохімічної обробки рослинної сировини дозволяє отримати целюлозу з низьким залишковим вмістом лігніну і зольністю, яка придатна для подальшого хімічного перероблення, зокрема для екстракції з неї наноцелюлози. Наведено приклади покращення показників якість паперу і картону за рахунок використання наноцелюлози із відходів рослинної сировини, що дозволяє скоротити споживання деревини та зменшити негативний вплив на довкілля.

Ключові слова: *стебла амаранту, целюлоза, наноцелюлоза, папір, картон.*

У сучасних умовах економічного та екологічного розвитку України особливого значення набуває пошук ефективних і сталих технологій виробництва товарів широкого споживання. Це стосується і продукції целюлозно-паперовій галузі – паперу і картону, рівень споживання яких в Україні залишається одним із найнижчих у Європі й не перевищує 32 кг на душу населення, у той час як у розвинених країнах цей показник сягає 250 кг [1]. Традиційною сировиною для виробництва паперу і картону є деревина, обсяг вільних запасів якої в Україні є обмеженим. Рівень лісистості в Україні становить лише близько 16%, що значно нижче за середній показник у країнах ЄС 39% [2]. Необхідність збереження існуючих лісових масивів відповідає принципам екологічної сталості і потребує пошуку альтернативних джерел целюлози, до яких відноситься відходи сільськогосподарських рослин. В Україні, як країні зі значним аграрним потенціалом, щорічно утворюється більше 1 млрд тонн відходів рослинного походження, які мало задіяні в промисловому виробництві [3]. Використання стебел сільськогосподарських культур, зокрема стебел амаранту, як джерела целюлози дозволять не лише зменшити обсяги використання деревини, але й створити замкнені ланцюги переробки твердих відходів біомаси.

Існуючі технології перероблення рослинної сировини у целюлозу, наприклад, сульфітний і сульфатний способи делігніфікації, забруднюють довкілля шкідливими сірковмісними речовинами [1] і потребують розробки альтернативних екологічно безпечних методів. Застосування новітніх технологій у целюлозно-паперовій промисловості є також актуальним

із-за необхідності заміни використання синтетичних хімічних допоміжних речовин (ХДР) із вичерпних джерел енергії (нафти, природного газу та кам'яного вугілля), що застосовуються у виробництві паперу і картону. Потрапляючи у навколишнє середовище, ці сполуки спричиняють забруднення водних об'єктів, повітря та ґрунтів, що унеможливлює досягнення екологічної рівноваги та зменшує тривалість життя людей і тварин.

Для заміни екологічно шкідливих ХДР упродовж останніх років проводяться активні дослідження з розробки технологій одержання і використання нових функціональних матеріалів, зокрема наноцелюлози, яка є біорозкладним, нетоксичним і високоефективним наповнювачем та армуючою речовиною, що має унікальні фізико-хімічні властивості: високу питому поверхню, механічну міцність, прозорість, термостійкість та здатність до утворення гідрогелів [4]. Тому розробка технологій одержання целюлози і наноцелюлози з відходів аграрної промисловості є інноваційним напрямом, що поєднує екологічну доцільність, економічну вигідність та технологічну ефективність. Такий підхід не лише сприяє впровадженню принципів "зеленої хімії" у целюлозно-паперову промисловість, а й розширює можливості використання наноцелюлози як функціональної добавки для поліпшення фізико-механічних та бар'єрних властивостей паперу і картону. Крім того, переробка аграрних відходів у цінні біоматеріали забезпечує скорочення викидів CO_2, зменшення обсягів спалювання твердих сільськогосподарських відходів, і тим самим підтримує національну кліматичну політику.

Метою даної роботи є огляд літератури щодо технологій переробки твердих відходів рослинної сировини у целюлозу і наноцелюлозу та використання наноцелюлози, отриманої зі стебел амаранту, як екологічно безпечного та ефективного компонента у виробництві паперу і картону.

Якість целюлози визначається способом делігніфікації, технологічними параметрами її одержання із рослинної сировини та вмістом основних компонентів, з яких вона складається [1]. В табл. 1 наведено хімічний склад стебел амаранту (*Amaranthus caudatus L.*) у порівнянні з іншими представниками рослинної сировини.

Таблиця 1. Хімічний склад рослинної сировини (%) [5, 6]

Сировина	**Целюлоза**	**Лігнін**	**Розчинні речовини у**		**СЖВ***	**Зольність**
			воді	**NaOH**		
Амарант	32,30	13,18	23,49	46,84	30,06	11,7
Очерет	49,3	22,9	10,6	19,4	2,3	3,5
Кукурудза	41,6–42,6	17,9–18,0	10,1–11,8	18,7–19,6	3,0–3,5	3,9–4,7
Соняшник	40,6–41,8	20,1–26,1	5,6–4,8	35,2-36,6	2,1-3,8	3,0–3,4
Рисова солома	28-40	12-16	16,7	38-48	5-7	15-20
Топінамбур	28,50	14,77	26,48	48,50	33,91	3,15
Береза	41,0	21,0	2,2	11,2	1,8	0,5
Сосна	47,0	27,5	6,7	19,4	3,4	0,2

**-СЖВ- смоли, жири, воски*

Аналіз наведених у табл. 1 даних свідчить про те, що за вмістом основних компонентів стебла амаранту відрізняються від представників хвойної і листяної деревини більшим вмістом речовин, що екстрагуються гарячою водою і лугом, і суттєво більшим вмістом

мінеральних речовин (зольністю), що потрібно враховувати в процесах одержання з нього волокнистих напівфабрикатів. За вмістом основних компонентів – целюлози, геміцелюлози і лігніну – стебла амаранту близькі до стебел кукурудзи, соняшника та рисової соломи, що свідчить про можливість їх перероблення на целюлозовмісну продукцію різного призначення. При цьому стебла амаранту мають менший вміст лігніну, ніж у деревині, що апріорі свідчать про необхідність менших витрат хімічних реагентів в процесах одержання з них целюлози. У складі амаранту спостерігається підвищений вміст золи та екстрактивних речовин, що з одного боку може ускладнювати очищення сировини, але з іншого — надає можливість для побічного вилучення корисних компонентів. Наприклад, високий вміст калію у зольній фракції (4,4%) створює передумови для хімічної рекуперації та потенційного використання зольних залишків амаранту як одного із комопнентів мінеральних добрив [5].

На основі хімічного складу рослинної сировини можна апріорі стверджувати про актуальність використання стебел амаранту як джерела для одержання з нього целюлози і наноцелюлози. За умов проведення певних стадій термохімічної обробки стебел амаранту, зокрема попередньої лужної екстракції та органосольвентного варіння стебел амаранту можна очікувати одержання целюлози з низьким залишковим вмістом лігніну менше 1% і зольністю менше 0,5%, як це спостерігалося в наших попередніх роботах [6-9]. Проведення подальшої обробки амарантової органосольвентної целюлози методами кислотного гідролізу або окисненням в ТЕМПО-середовищі або глибокими евтектичними розчинниками можна отримати наноцелюлозу з такими показниками якості, як для наноцелюлози із стебел інших рослин: наночастинки діаметром 5-25 нм, щільністю до 1,52 г/см^3, прозорістю до 81,6%, міцністю на розрив до 65 МПа [6-9]. Наноцелюлоза (НЦ) з такими показниками може бути використана як зміцнююча добавка у виробництві паперу і картону. Так, наприклад, у роботі [10] показано вплив витрати наноцелюлози на розривну довжину паперу для пакування харчових продуктів (рис. 1).

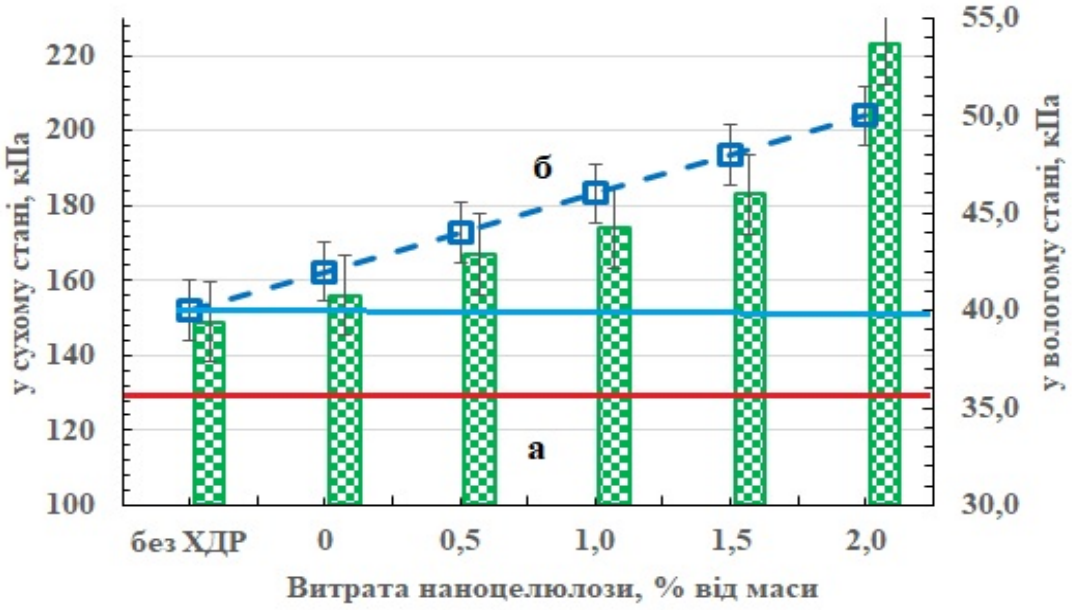


***Рисунок 1**. Залежність абсолютного опору продавлюванню зразків паперу від витрати НЦ у масу в сухому (а) і вологому (б) стані (горизонтальні лінії – вимоги стандарту для паперу у сухому (червона) і вологому (синя) стані)*

Із отриманих залежностей видно, що збільшення вмісту НЦ у композиції паперу призводить до покращення значень показника абсолютного опору продавлювання як у сухому, так і у вологому стані. Підвищення показника абсолютного опору продавлювання зразків паперу пояснюється утворенням додаткових водневих зв'язків частинок НЦ, які мають високу поверхневу активність, з макромолекулами целюлози паперової маси, що сприяє утворенню більш міцних зв'язків між ними [10].

У роботі [11] показано, що додавання 10% нанофібрильованої целюлози (НФЦ) до целюлози з твердих порід деревини забезпечує суттєве зростання показника міцності на розрив, навіть при зниженні маси листа з 60 г/м² (рис. 2а). Крім покращення міцності, додавання НФЦ дозволяє зменшити масу волокон паперу, що зменшує витрати на сировину без втрати якості кінцевого продукту. Як показано на рис. 2б, при оптимальному вмісті НФЦ (6% для дешевших волокон і до 10% для дорожчих) можна досягти значного зниження вартості волоконної сировини — до 149 доларів США на тонну при використанні волокон з високою ринковою вартістю [11].

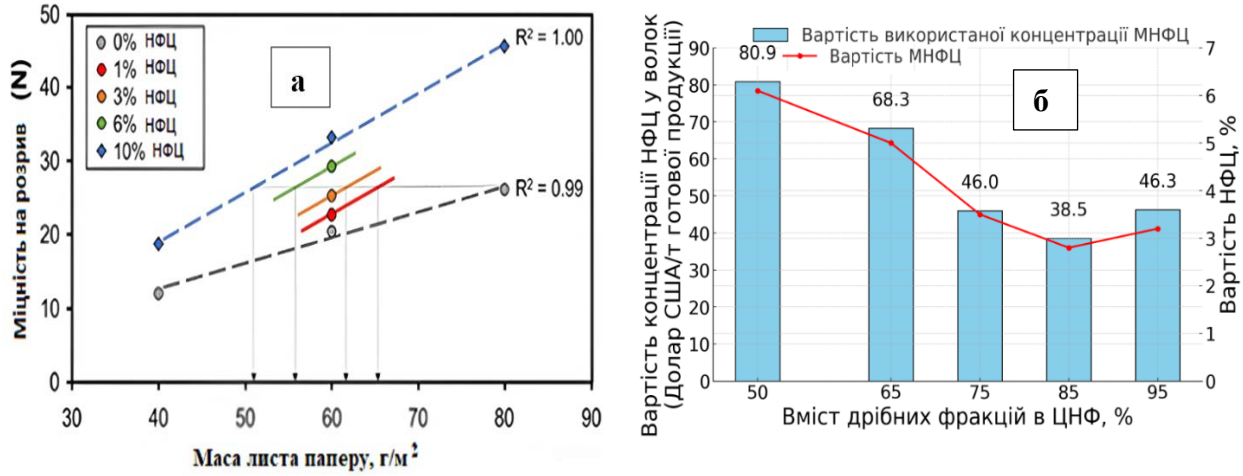


Рисунок 2. *Залежність показника міцності на розрив паперу з додаванням наноцелюлози (а) і вартості готової продукції від вмісту НФЦ (б)*

Окрім міцності, НЦ значно покращує бар'єрні властивості паперу. У дослідженнях [12] показано, що додавання 4,5% НЦ знижує пористість матеріалу на 80%, що позитивно впливає на водостійкість і газонепроникність (рис. 3а) та особливо важливо у виробництві пакувальних матеріалів, де потрібна надійна ізоляція від вологи, жирів та кисню.

Додавання НЦ призводить також до підвищення індексу розриву (рис. 3б). Так, додавання 6% НЦ підвищує міцність на розрив на 35%, що підтверджує ефективність армування волокнистої структури наноцелюлозними компонентами [12].

Вплив додавання наноцелюлози у волокнисту масу на показники поверхневої вбирності води під час однобічного змочування і опору продавлювання для поверхневого шару ($Коббб_{1800}$) і нижнього шару ($Коббб_{60}$) картону тарного наведено на рис. 4 [9]. Отримані дані свідчать, що додавання наноцелюлози у волокнисту масу підвищує вологостійкість і механічну міцність картону. При цьому додавання біорозкладної наноцелюлози у волокнисту масу з витратами 4 кг/т від маси картону дозволяє зменшити витрати шкідливої ХДР на 50%, що сприятиме покращенню стану довкілля і здоров'я людей та отримати значення показників, які задовольняють вимогам стандарту підприємства.

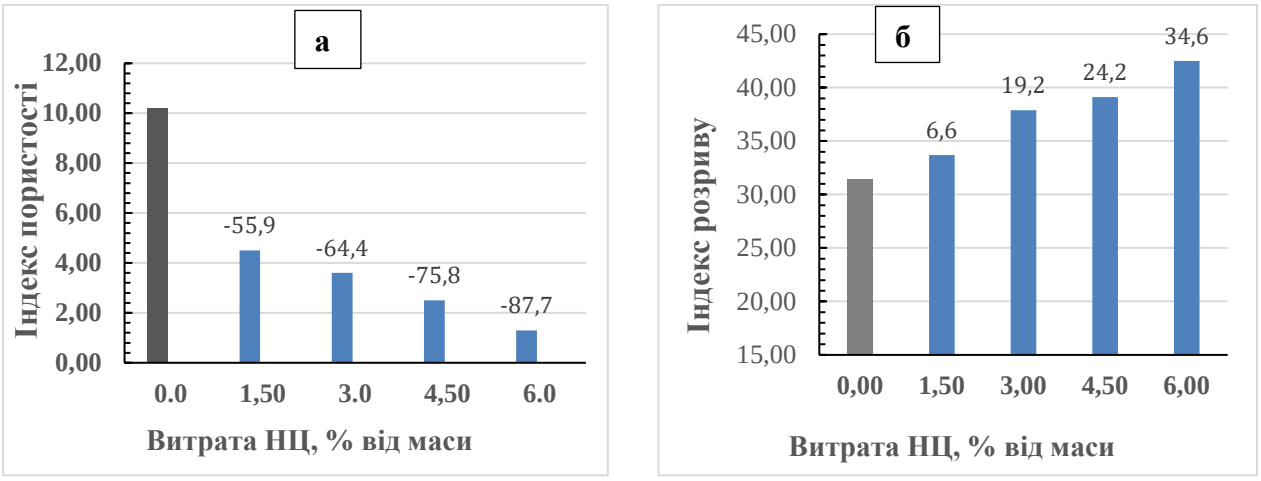


***Рисунок 3**. Залежність індексів пористості (а) і розриву (б) паперу від витрати наноцелюлози в масу паперу (цифри на рисунках показують зміну відповідних показників у відсотках від значення для зразків паперу без використання наноцелюлози)*

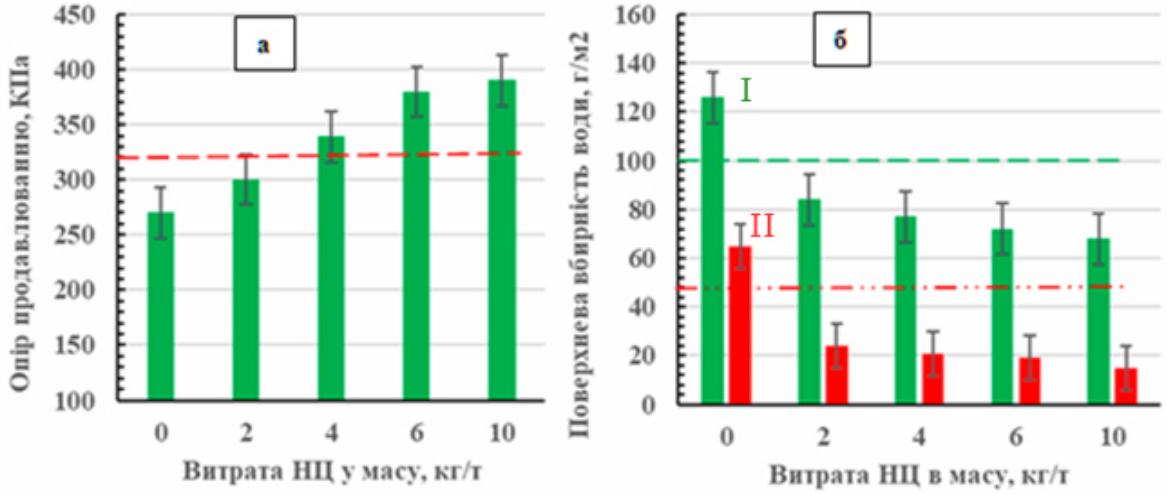


***Рисунок 4**. Залежності опору продавлювання (а) і поверхневої вбирності води під час однобічного змочування (б) для поверхневого шару (I – Кобб1800) і нижнього шару (II – Кобб60) картону тарного від витрат НЦ (горизонтальні лінії – вимоги стандарту)*

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про доцільність використання стебел амаранту як альтернативного джерела целюлози і наноцелюлози для потреб целюлозно-паперової промисловості. Хімічний склад стебел амаранту, зокрема високий вміст целюлози та низький рівень лігніну, є сприятливим для одержання целюлози і наноцелюлози за менших витратами хімічних реагентів. Отримана наноцелюлоза показала високу ефективність як функціональна добавка: вона істотно підвищує фізико-механічні властивості паперу і картону, знижує його масу без втрати міцності, покращує бар'єрні характеристики та сприяє зменшенню витрат волокнистої сировини. Наведені дані підтвердили наявність лінійної залежності між міцністю на розрив і масою листа паперу з додаванням наноцелюлози в його волокнисту композицію. При цьому максимальний економічний ефект від додавання наноцелюлози досягається за її витрати 6–10% в залежності від вартості волокна.

Використання наноцелюлози, отриманої з амаранту, є ефективним екологічно обґрунтованим підходом, що дозволяє підвищити якість картонно-паперової продукції, скоротити споживання традиційної сировини та зменшити негативний вплив шкідливих синтетичних хімічних допоміжних речовини на довкілля. З огляду на наявність значного обсягу цього виду сільськогосподарських залишків в Україні, дана технологія має високий потенціал для широкого промислового впровадження.

Література

1. Барбаш, В.А. Технології перероблення недеревної рослинної сировини у целюлозовмісну продукцію : монографія / В. А. Барбаш. Київ : Каравела, **2022**. – 360 с. ISBN 978-996-96914-60. https://caravela.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=282

2. Forests in the EU: 39% of the EU is covered with forests. Eurostat, 2021. 5 с. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20210321-1

3. Русан, В.М.; Жураковська, Л.А. Аграрний сектор україни у 2023 році: складники стійкості, проблеми та перспективні завдання. Центр економічних і соціальних досліджень. 2024, 7 с. https://niss.gov.ua/sites/default/files/2024-02/az_agrosektor_15022024.pdf

4. Postek, M.T.; Moon, R.J.; Rudie, A.W.; Bilodeau, M.A. Production and Applications of Cellulose Nanomaterials. *TAPPI PRESS,* **2013**, 321 p., ISBN: 978-1-59510-224-9

5. Fišerová, M.; Gigac. J.; Majtnerová, A.; Szeiffová, G. Evaluation of annual plants (Amaranthus caudatus L., Atriplex hortensis L., Helianthus tuberosus L.) for pulp production. *Cell. Chemystry & Technology*. **2006**, *40(6),* 405. https://www.researchgate.net/publication/280020563

6. Barbash, V.A., Yashchenko, O.V. Preparation, Properties and Use of Nanocellulose from Non-Wood Plant Materials. In: Novel Nanomaterials, Editor Krishnamoorthy K., pp. 61-83, IntechOpen, London, **2021**. ISBN 978-1-83881-025-2. DOI: 10.5772/intechopen.94272

7. Barbash, V.A.; Yashchenko, O.V.; Gondovska, A.S.; Deykun I.M. Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks. *Appl Nanosci*. **2022**, *12*, 835. https://doi.org/10.1007/s13204-021-01749-z.

8. Barbash, V.A.; Yashchenko, O.V.; Yakymenko, O.S. et al. Extraction, properties and use of nanocellulose from corn crop residues. *Appl Nanosci*. **2023**. https://doi.org/10.1007/s13204-023-02926-y

9. Барбаш, В.А.; Якименко, О.С.; Березовський, Г. Г.; Ященко, О. В. Вплив соняшникової наноцелюлози на показники якості картону тарного вологостійкого. *Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. **2024**, *4*, 69. https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2024.319131

10. Барбаш, В.А.; Якименко, О.С.; Ященко, О.В. Вплив конопляної наноцелюлози на показники якості паперу для пакування харчових продуктів. *Вопроси хімії і хіміческої технології.* **2023**, *6*, 5.

11. Zambrano, F.; Starkey, H.; Wang, Y.; Abbati de Assis, C.; Venditti, R.; Pal, L.; Jameel, H.; Hubbe, M. A.; Rojas, O. J.; Gonzalez, R. Using micro- and nanofibrillated cellulose as a means to reduce weight of paper products: A review, *BioResources*. **2020**, 15(2), 4553.

12. Sanchez-Salvador, J.L.; Balea, A.; Monte, M.C.; Negro, C.; Miller, M.; Olson,;J., Blanco A. Comparison of mechanical and chemical nanocellulose as additives to reinforce recycled cardboard. *Scientific Reports,* **2020**, *10*, 60507. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60507-2

TECHNOLOGIES FOR OBTAINING NANOCELLULOSE FROM AMARANTH STEMS AND ITS USE IN PAPER AND CARDBOARD PRODUCTION

Hryhorii LYZAK
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine
https://orcid.org/0009-0007-9502-4572

Daniil DRAGAN
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine
https://orcid.org/0009-0003-7569-9143

Valerii BARBASH
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-7933-6038

Abstract

The technologies for processing solid waste of plant raw materials using the example of amaranth stems into cellulose and nanocellulose and the use of nanocellulose in the production of paper and cardboard are analyzed. It is shown that the use of two-stage thermochemical treatment of plant raw materials allows to obtain cellulose with a low residual lignin content and ash content, which is suitable for further chemical processing, in particular for the extraction of nanocellulose from it. Examples of improving the quality of paper and cardboard through the use of nanocellulose from plant waste are given, which allows to reduce wood consumption and reduce the negative impact on the environment.

Key words: amaranth stems, cellulose, nanocellulose, paper, cardboard.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331210

ВПЛИВ pH НА КОРОЗІЙНУ АГРЕСИВНІСТЬ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОДНО-НАФТОВИХ СЕРЕДОВИЩ

Антон ЛИТВИН, Юлія НОСАЧОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
email: litvinanton047@gmail.com

Анотація

В умовах сьогодення ефективне та безпечне функціонування нафтовидобувної та нафтопереробної галузі відповідає за економічну та екологічну безпеку держави. Нафтовмісні середовища відзначаються підвищеною агресивністю щодо металів через присутність води, сірководню, органічних кислот, хлоридів та інших складових. В цих умовах корозія може мати електрохімічне, хімічне чи біологічне підґрунтя, що вимагає комплексного підходу до її профілактики.

У даній роботі проаналізовано вплив pH на агресивність корозії мінералізованих водно-нафтових середовищ щодо вуглецевої сталі Ст20. Шляхом експерименту встановлено залежність швидкості корозії у розчинах NaCl з концентраціями 30 та 100 г/дм³, з додаванням нафти Кременчуцького родовища, при варіативних значеннях pH (5–9) та при кімнатній температурі. З'ясовано, що присутність нафти зменшує швидкість корозії через утворення ізолюючої нафтової плівки в 2 – 2,5 рази, проте швидкість корозії була на рівні 0,01 – 0,02 г/(м^{2}год)*. Водночас для таких складних за вмістом компонентів середовищ помітного впливу pH відмічено не було, спостерігалось зниження швидкості корозії на 20 – 30 % при нейтральному pH 6 – 8.*

***Ключові слова**: корозія, водно-нафтове середовище, pH, мінералізовані розчини, нафта, вуглецева сталь, NaCl.*

Постановка проблеми. Корозія – це природне, але вкрай небажане явище, яке супроводжує використання металевих матеріалів у багатьох галузях виробництва. Вона призводить до поступового руйнування конструкцій, обладнання та трубопроводів, що у свою чергу має серйозні наслідки не тільки для економіки, але й для навколишнього середовища. Руйнування металевих ємностей або трубопроводів через корозію може спричинити витоки токсичних речовин – таких як нафтопродукти, хімічні реагенти, високомінералізовані середовища – в ґрунт, водні ресурси або атмосферу. Це ставить під загрозу екосистеми, тваринний і рослинний світ і здоров'я людини. Ефективний антикорозійний захист сприяє зменшенню споживання природних ресурсів. Метали, що вийшли з ладу внаслідок корозії, потребують заміни, а це означає – додаткове видобування руди, витрати енергії на плавку та виготовлення нових виробів. Таким чином, боротьба з корозією – це також шлях до ресурсозбереження і зменшення викидів парникових газів.

Водно-нафтові середовища – це складні системи, що включають нафту, воду, розчинені гази, мінеральні солі, механічні домішки та інші сполуки. Ці середовища широко зустрічаються у нафтовидобувній галузі, при транспортуванні та зберіганні нафти. Вони здатні спричиняти агресивну корозію металевих частин обладнання, особливо в умовах підвищеної температури та тиску [1]. Супутньо-пластові води (СПВ) – невід'ємна частина процесу нафтовидобутку, адже вони підіймаються разом з нафтовою продукцією з надр. Ці води являють собою розчини, які з'являються з нафтових шарів. Їхній склад залежить від геологічних, хімічних та фізичних особливостей родовища, тому він є досить різним. Зазвичай, СПВ мають мінеральні солі, залишки нафти, органічні сполуки, сірководень, а також механічні домішки. Склад нафтозабруднених вод визначає їхню агресивність стосовно металів. Присутність у воді хлоридів, сульфатів, органічних кислот, сірководню та інших активних речовин суттєво підвищує корозійну активність середовища. Найбільшу небезпеку становлять хлориди, які провокують пітінгову корозію, та сірководень, який сприяє сульфідному розтріскуванню металів [2].

Існує багато факторів, які впливають на збільшення швидкості реакції окиснення внаслідок підсилення корозійних процесів та термін служби того чи іншого обладнання на підприємстві. До зовнішніх чинників електрохімічної корозії металів належать: активність водневих іонів (pH), склад і концентрація корозійного середовища, швидкість руху середовища, температура, тиск, контакт з іншими металами, зовнішні й блукаючі струми тощо.

Аналіз попередніх досліджень. Значення pH впливає на швидкість електрохімічної корозії металів, змінюючи потенціал катодних реакцій деполяризації, в яких беруть участь іони H^+ або OH^-, на розчинність продуктів корозії та можливість утворення захисних плівок на поверхні кородуючого металу, а також на перенапругу електродних реакцій. В роботі [3] показано, що швидкість корозії у водних середовищах в діапазоні pH 6,5 – 8,5 практично не залежить від pH середовища. При цьому при високих концентраціях солей у воді за рахунок високої електропровідності розчинів катодні і анодні ділянки кородуючих металів знаходяться на великій відстані. Це заважає утворенню щільних оксидних плівок на поверхні металів, а значить уповільнення швидкості корозії з часом не відбувається. Наявність нафти дещо уповільнює швидкість корозії за рахунок як блокування нафтовою плівкою доступу кисню в систему, так і за рахунок корозійної інертності хімічних компонентів нафти [2].

Саме через велику кількість факторів, що впливають на процеси протікання корозії в таких середовищах **метою** було детальне вивчення саме впливу pH, через його потенційну роль в захисті металів.

Методика роботи. В якості корозійного середовища використовували розчини NaCl з концентраціями 30 і 100 г/дм^3 та водно-нафтові суміші розчинів NaCl та нафти Кременчуцького родовища в концентрації 50 см^3/дм^3. Для вивчення впливу pH вихідні розчини доводили до pH 5, 6, 7, 8, 9 розчинами сірчаної кислоти або соди. Для вивчення впливу температури використовували кімнатну. Як кородуючий матеріал використовували пластини зі Ст20. Дослід проводився протягом 168 годин. Результати приведені як середнє арифметичне з 3-х паралельних дослідів. Ступінь корозії W – г/(м^{2}год), визначали масометричним методом і розраховували за формулою:

$$W = \frac{(Mn-Mk)}{S\cdot\tau},$$

де Mn – початкова маса зразка, г;
Mk – маса зразка після дослідження, г;
S – площа зразка, м^2;
τ – тривалість досліджень, год.

Виклад основного матеріалу. При високій мінералізації підвищення концентрації розчину мало впливає на швидкість протікання корозійних процесів, проте при підвищенні концентрації до 100 г/дм^3 спостерігалось зменшення швидкості корозії приблизно в 2 – 2,5 рази. При дуже високій концентрації хлоридів в'язкість розчину зростає, і кисень гірше дифундує до поверхні металу. У концентрованих розчинах можуть утворюватися щільні плівки на поверхні металу (наприклад, $FeCl_2$), які частково ізолюють метал від подальшого впливу розчину.

***Т*аблиця 1.** Залежність швидкість корозії Ст 20 в розчині NaCl при кімнатній температурі в залежності від pH середовища та наявності нафти

Концентрація вихідного розчину NaCl, г/дм^3	**Температура, ºС**	**Концентрація нафти, см^3/дм^3**	**pH**	**Швидкість корозії г/(м^2·год)**
30	15	---	5	0,0525
30	15	---	6	0,0560
30	15	---	7	0,0586
30	15	---	8	0,0540
30	15	---	9	0,0544
30	15	50	5	0,0174
30	15	50	6	0,0262
30	15	50	7	0,0256
30	15	50	8	0,0287
30	15	50	9	0,0225
100	15	---	5	0,0348
100	15	---	6	0,0339
100	15	---	7	0,0308
100	15	---	8	0,0340
100	15	---	9	0,0204
100	15	50	5	0,0131
100	15	50	6	0,0142
100	15	50	7	0,0110
100	15	50	8	0,0158
100	15	50	9	0,0096

З проведених досліджень видно, що вплив pH не суттєвий, хоча і спостерігається деяка тенденція до зменшення швидкості корозії з підвищенням pH на 30 – 50%.

Наявність нафти в системі знижує швидкість корозії в 2 – 5 разів в залежності від концентрація мінеральної частини і наявності нафти. Нафта діяла як певний бар'єр, обмежуючи доступ кисню та знижуючи швидкість корозії, також позитивний вплив мають компонентів нафти, які можуть ізолювати поверхню металу.

В подальшому планується більш детальне дослідження впливу pH середовища на швидкість корозії через вилучення кисню, як основного чинника корозійних процесів, а також дослідження зміни ефективності інгібіторів корозії при зміні pH середовища.

Література

1. Слободян З.В., Никифорчин Г.М., Петрущак О.І. Корозійна тривкість трубної сталі у нафто-водних середовищах // Фіз.-хім. механіка матеріалів **2002**, № 3, с. 93-96.

2. Космина, М. М., Носачова, Ю. В., Шаблій, Т. О. Оцінка ефективності інгібіторного захисту металевих поверхонь в агресивних водно-нафтових середовищах. Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. **2024**, 62-68. doi:10.20535/2617-9741.1.2025.325849

3. Тамазашвілі, А. Т., Мазна, Ю. І., Малихіна, К. А., & Гомеля, М. Д. Оцінка впливу фізико-хімічних факторів на корозійну активність води. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **2013**, *5*(6 (65)), 15-19.

INFLUENCE OF pH ON THE CORROSIVE AGGRESSIVENESS OF MINERALIZED WATER-OIL ENVIRONMENTS

Anton LYTVYN
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine

Yuliia NOSACHOVA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6431-7128

Abstract

In today's conditions, the effective and safe functioning of the oil production and oil refining industry is responsible for the economic and environmental security of the state. Oil-containing environments are characterized by increased aggressiveness towards metals due to the presence of water, hydrogen sulfide, organic acids, chlorides and other components. Under these conditions, corrosion can have an electrochemical, chemical or biological basis, which requires a comprehensive approach to its prevention.

This work analyzes the influence of pH on the aggressiveness of corrosion of mineralized water-oil environments towards carbon steel St20. The dependence of the corrosion rate in NaCl solutions with concentrations of 30 and 100 g/dm³, with the addition of oil from the Kremenchuk field, at variable pH values (5–9) and at room temperature was established by experiment. It was found that the presence of oil reduces the corrosion rate due to the formation of an insulating oil film by 2-2.5 times, but the corrosion rate was at the level of 0.01-0.02 g/(m^{2}h). At the same time, for such complex media in terms of component content, no noticeable effect of pH was observed, a decrease in the corrosion rate by 20-30% was observed at a neutral pH of 6-8.

Keywords: corrosion, water-oil medium, pH, mineralized solutions, oil, carbon steel, NaCl.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330282

INFRARED SPECTROSCOPY IN THE RESEARCH OF STRUCTURAL FEATURES OF MEMBRANES MADE OF MODIFIED CELLULOSE FIBER

Sergii MYLOKOST[1], Vita HALYSH[1,2], Mykola GOMELYA[1]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv 03056, Ukraine
[2]*Chuiko Institute of Surface Chemistry, NAS of Ukraine*
17 Oleha Mudraka Str., Kyiv 03164, Ukraine
e-mail: mylokost@gmail.com

Abstract

This study explores the use of modified cellulose membranes for water purification, focusing on the removal of color from sodium humate solutions. Cellulose, a renewable and eco-friendly polymer, was modified with a 1:1 mixture of monoethanolamine and epichlorohydrin at consumption of 5%, 10%, and 15%. The membranes (80 g/m²) were tested on 100 mg/dm³ sodium humate solutions. Color removal efficiency was highest (98%) with the 15% modified membrane. The infrared spectra confirmed successful modification by the appearance of a peak at 1598 cm⁻¹. The results demonstrate the potential of chemically modified cellulose membranes for sustainable water treatment applications.

Key words: *membrane, cellulose, modified cellulose fibres, natural polymer, water treatment, infrared spectroscopy, epichlorohydrin, monoethanolamine.*

The fast growth of industry and agriculture, along with the industrialization of production, has increased the need for water and wastewater treatment [1]. As clean water becomes less available and environmental rules become stricter, it is important to find better ways to clean and reuse water. One of the most popular and promising methods is membrane technology [2]. It is widely used because it works well, uses little energy, and can remove many types of pollutants. Membrane systems are often used in water treatment plants and factories, and they continue to be improved and modernized.

Cellulose is a good material for making membranes [3]. It is a natural and renewable polymer, which means it is safe for the environment and not expensive. Cellulose also has useful properties, such as good strength, being water-friendly (hydrophilic), and resisting many chemicals. These features make cellulose-based membranes suitable for filtering water, cleaning industrial waste, and making drinking water safer. Also, cellulose can be changed or mixed with other materials to improve its performance, which makes it a flexible option for new membrane technologies [4].

The modification of the prepared cellulose material was performed using a 4% mass concentration of cellulose in the solution. To improve the structural and functional properties of the resulting membranes, modifying agents were added in amounts ranging from 5% to 15% by weight, relative to the total mass of the cellulose fibers. A mixture of monoethanolamine (MEA) and epichlorohydrin (ECH) was used as the modifying system. These components were combined in an equal weight ratio of 1:1,

ensuring a balanced interaction between the reactive functional groups of both substances. Modified cellulose with a modifier content of 5, 10, and 15% was used to prepare membrane samples with a mass of 80 g/m², which were formed on a synthetic fabric in a Büchner funnel. The obtained membranes were air-dried and evaluated for their ability to reduce color in model water solutions containing sodium humates at a concentration of 100 mg/dm³.

The results of laboratory studies on the change in permeate color over permeate collection time are presented in Fig.1. The color of the selected permeate samples was measured at 400 nm using a photoelectric colorimeter. While the 15% modifier membrane exhibited the best ability to reduce the color of the sodium humate solution, the 5% and 10% membranes were only slightly less effective in this regard. Ultimately, the 15% modifier membrane provided the highest efficiency (98%) and lowest residual color when filtering a 100 mg/l sodium humate solution.

The infrared spectra of the obtained cellulose membrane samples from modified fiber, in comparison with unmodified fiber, are presented in Fig. 2.

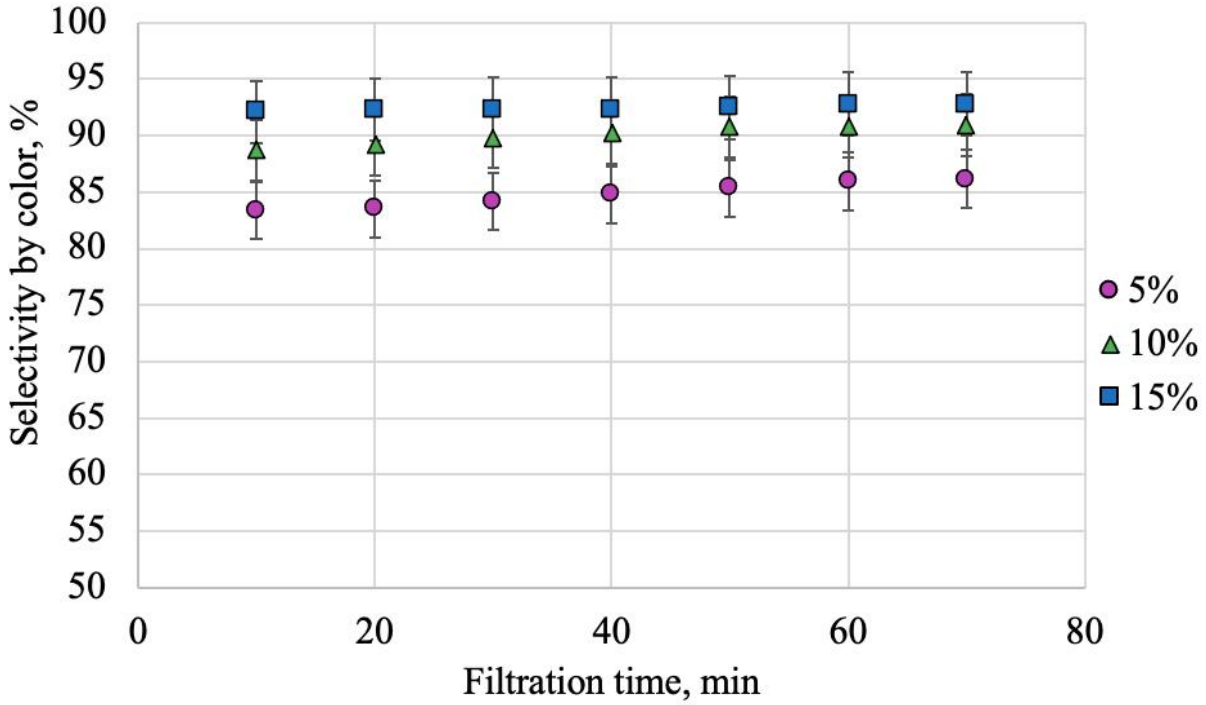


***Figure 1**. Influence of filtration time on color selectivity during filtration of sodium humate solution using cellulose membranes with varying modifier conten*

The presented spectra reveal a new absorption peak at 1598 cm^{-1} in the modified cellulose samples, a characteristic signal for the N-H bending vibrations in NH_2 groups. This band is absent in the original cellulose spectrum. Furthermore, the intensity of this peak at 1598 cm^{-1} increases with higher modifier content, indicating effective immobilization of the modifier within the membrane structure.

The obtained results will form the basis for further research aimed at optimizing the conditions for obtaining and utilizing membranes made from modified cellulose fiber.

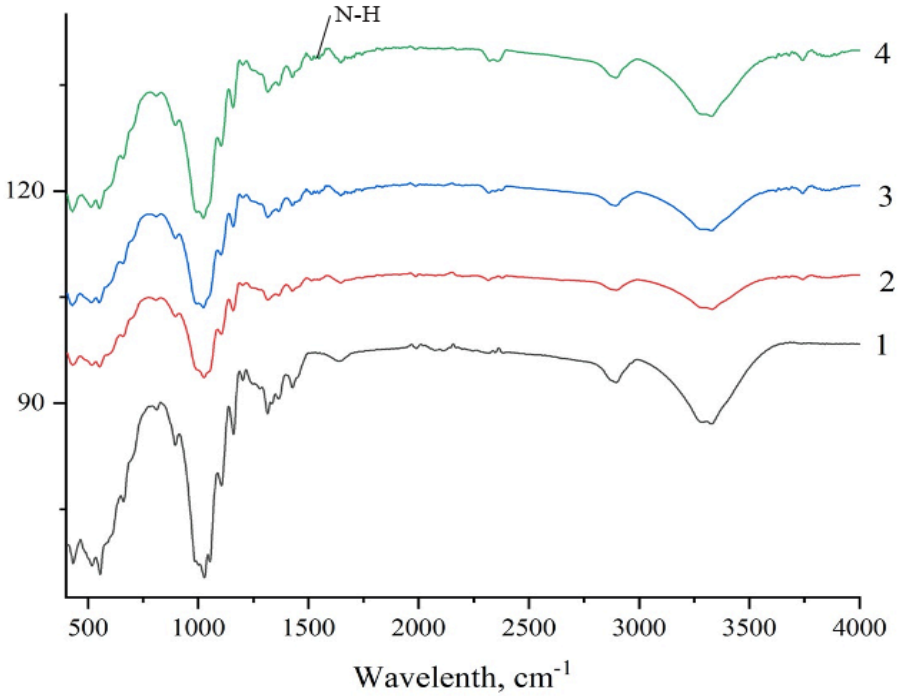


***Figure 2**. IR spectra of membranes made from cellulose fiber with different modifier content: 1 - 0, 2 - 5%, 3 - 10%, 4 - 15%.*

References

1. Radovenchyk, I.; Trus, I.; Halysh, V.; Krysenko, T.; Chuprinov, E.; & Ivanchenko, A. Evaluation of optimal conditions for the application of capillary materials for the purpose of water deironing. *Ecological Engineering & Environmental Technology* **2021**, *22*. https://doi.org/10.12912/27197050/133256

2. Vatanpour, V.; Pasaoglu, M. E.; Barzegar, H.; Teber, O. O.; Kaya, R.; Bastug, M.; Koyuncu, I. Cellulose acetate in fabrication of polymeric membranes: A review. *Chemosphere* **2022**, 295, 133914. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133914

3. Zaborniak, I.; Chmielarz, P. Polymer-modified regenerated cellulose membranes: following the atom transfer radical polymerization concepts consistent with the principles of green chemistry. *Cellulose* **2023**, 30, 1-38. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04880-4

4. Rana, A. K.; Gupta, V. K.; Saini, A. K.; Voicu, S. I.; Abdellattifaand, M. H.; Thakur, V. K. Water desalination using nanocelluloses/cellulose derivatives-based membranes for sustainable future. *Desalination* **2021**, 520, 115359. https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115359

ІНФРАЧЕРВОНА СПЕКТРОСКОПІЯ В ДОСЛІДЖЕННІ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕМБРАН З МОДИФІКОВАНОГО ЦЕЛЮЛОЗНОГО ВОЛОКНА

Сергій МИЛОКОСТ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0007-8892-8426

Віта ГАЛИШ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України
вул. Олега Мудрака, 17, м. Київ, 03164, Україна
https://orcid.org/0000-0001-7063-885X

Микола ГОМЕЛЯ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/ 0000-0003-1165-7545

Анотація

Це дослідження стосується використання модифікованих целюлозних мембран для очищення води, зосереджуючись на видаленні кольоровості на прикладі розчину гумату натрію. Целюлозу, відновлюваний та екологічно чистий полімер, модифікували сумішшю моноетаноламіну та епіхлоргідрину у співвідношенні 1:1 з витратами 5%, 10% та 15%. Мембрани (80 г/м^2) тестували на розчинах гумату натрію з концентрацією 100 мг/дм^3. Ефективність видалення кольоровості була найвищою (98%) для 15% модифікованої мембрани. ІЧ-спектри підтвердили успішну модифікацію появою піку при 1598 см$^{-1}$. Результати демонструють високий потенціал використання модифікованих целюлозних мембран.

Ключові слова: мембрана, целюлоза, модифіковані целюлозні волокна, природний полімер, водоочищення, інфрачервона спектроскопія, епіхлоргідрин, моноетаноламін.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2025.330387

PROCESS IMRPOVEMENT ON RECOVERY OF RAW MATERIALS FROM MULTILAYER COMPOSITES

Gytis MILIAUSKAS, Gintaras DENAFAS
Kaunas University of Technology
K. Donelaičio g. 73, Kaunas, Lithuania
e-mail: g.miliauskas@ktu.edu

Abstract

At end of life, waste PCBs (WPCBs) represent both a valuable resource—containing copper, nickel, precious metals, and polymeric materials—and an environmental hazard if landfilled or incinerated. This work develops and optimizes a modular, closed-loop recycling line that (1) delaminates epoxy resin from fiberglass and embedded metal via dimethyl sulfoxide (DMSO) extraction, comparing conventional thermal swelling with microwave-assisted processing to maximize resin yield, preserve fiber integrity, and assess solvent recyclability; (2) mills the residual PCB fragments under a design-of-experiments framework to tune particle size distribution (2–10 mm) and energy use, including evaluation of process-control additives; (3) fractionates milled material through sequential magnetic, eddy-current, electrostatic, and density separation, optimizing separation thresholds and recovering ferrous, non-ferrous, and non-metallic streams; (4) conducts hydrometallurgical extraction on the mixed metal fraction, including alkali pre-treatment, acid leaching (with oxidant enhancement), solvent-extraction, and electrowinning to produce high-purity metal products; and (5) scales the optimized processes from laboratory (2 L) to pilot (200 L) stirred reactors under geometric similitude. Finally, mass and energy balances, closed-loop solvent and water recycling. Key technical uncertainties—including solvent–resin selectivity, milling energy–liberation trade-offs, leaching kinetics in complex residues, scale-up hydrodynamics, and solvent recovery losses—are systematically investigated. The resulting platform offers a viable path toward circular, sustainable PCB recycling with minimized waste and maximized resource recovery.

Key words: *circular economy, organic extraction, PCB recycling, hydrometallurgical extraction, prototype design.*

Multilayer Composites (MC) are widely used in all electronic devices, their composition is rich in materials, exclusive electrical, optical, insulating, and mechanical properties [1]. One of the MC types is Printed Circuit Boards (PCB), which are the mediums used to connect components to one another inside the PCB layers. PCB base materials consist of three structural components: resins, reinforcement layers (glass fiber), and the conductive foil [2]. Brominated epoxy resins are the most commonly used material for adding flame retardancy to the final product.

Many other resin systems are also available, such as epoxy blends with other types of resins [3]. PCBs can have different designs (Fig. 1), however the function of all PCB models is the same - to

support a number of mounted electronic components and provide electrical connection as well as insulation between the components if needed. PCBs can be single-sided (one copper layer), double-sided (two copper layers on both sides of one substrate layer), or multi-layer (outer and inner layers of copper, alternating with layers of substrate).

In the last decade, the recycling of waste printed circuit boards (WPCBs) has increased for 2 reasons:

1. WPCBs contain a considerable amount of metallic and non-metallic components such as copper (Cu), iron (Fe), tin (Sn), nickel (Ni), lead (Pb), zinc (Zn), silver (Ag), gold (Au), palladium (Pd), and fiberglass and resins. Thus WPCBs could be used as a source of valuable raw materials.
2. WPCBs are classified as hazardous waste. These substances can be released as a result of landfilling or treating with traditional methods such as incineration. [4].

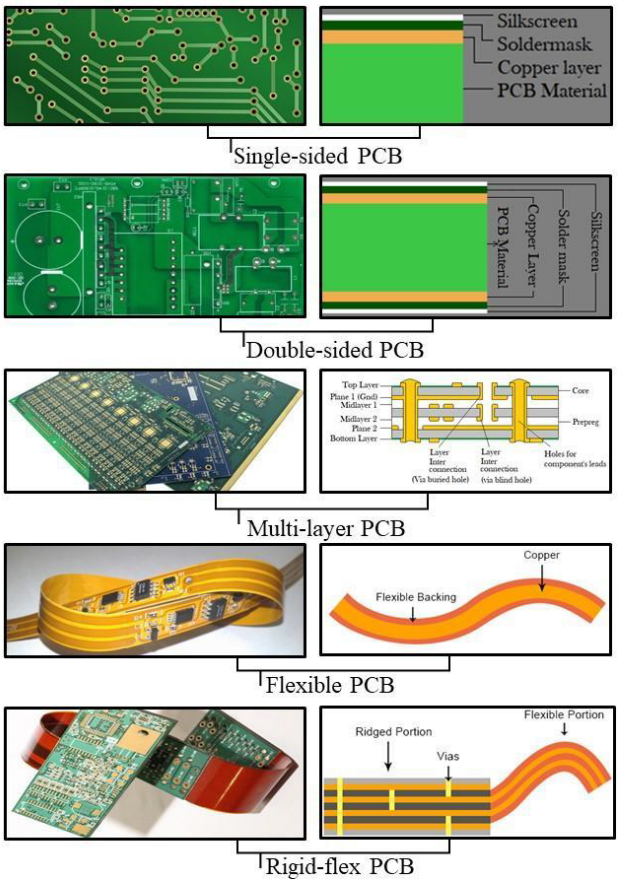


Figure 1. *Examples of PCB types [5],[6],[7]*

Removing harmful materials safely is the key for successful recycling. Removing toxic components fron resins using solvent-based delamination was shown to be the most efficient in terms of environmental impact and cost when compared to other techniques such as thermal treatment and crushing. Other methods have disadvantages in terms of power consumption, release of gases, and recycling rate. In order to be more efficient, a number of investigations have been performed on the delamination of WPCBs by solvents and/or water-soluble oxidants. The most important reason for employing organic solvents is to dissolve resins, separating metal and non-metal components of WPCB's. Using the solvent delamination technique, many components and layers of a full-size WPCB can be seperated and recovered. There are technologies that combine three treatments:

chemical, ultrasonic and mechanical, with the use of dimethylacetamide to dissolve epoxy resin [8]. Delamination with the organic solvents can only be performed at higher temperatures, so microwave medium can greatly enhances the process efficiency, increasing resins dissolution up to 2 times compared to just thermal treatment [9].

We are developing and optimizing PCB recycling process/line (Fig. 2). First step is solvent-based (DMSO) delamination process to separate the resin from the fiberglass and embedded metal. Specifically, we will compare thermal extraction and microwave-assisted extraction by swelling PCBs in DMSO to maximize resin yield and preserve fiber integrity. Out of all the organic solvents, we have chosen DMSO due to it's low toxicity (compared to other solvents that were researched) and easy access. We will then investigate the DMSO recyclability by monitoring viscosity, chemical purity, and extraction performance over multiple extractions. There are certain unknowns regarding our process: solvent–resin selectivity across different PCB laminates; kinetics and energy consumption in microwave vs. thermal extraction; limits to solvent reuse before extraction efficiency decreases.

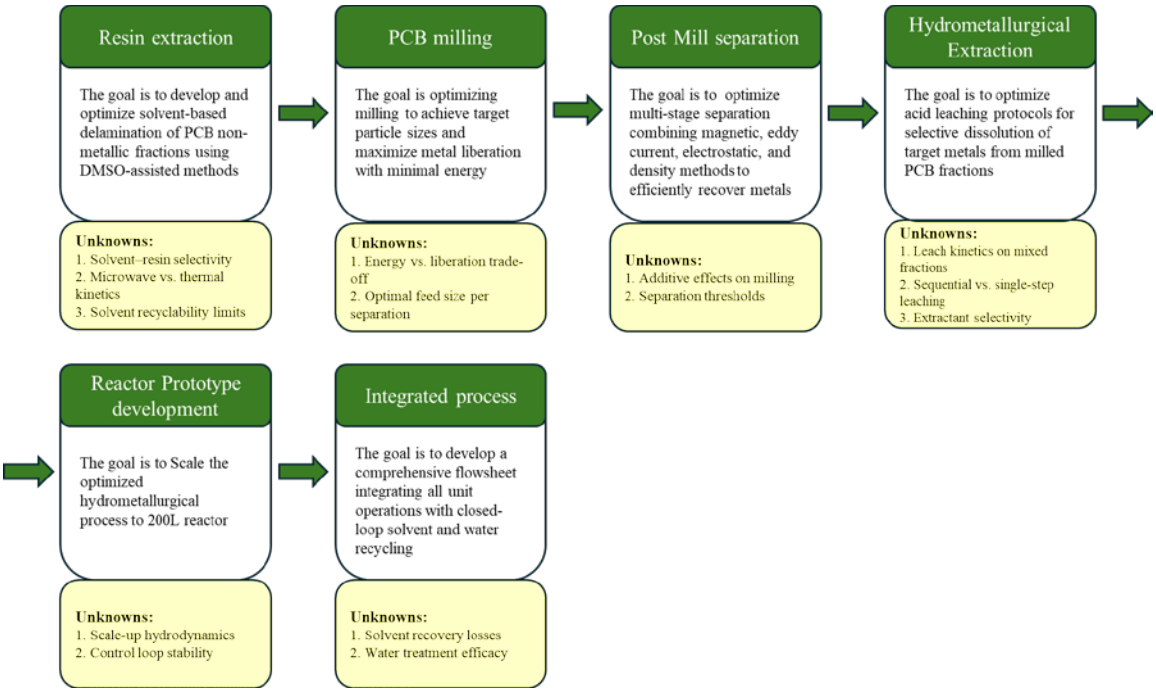


***Figure 2**. Project development stages and uncertainty areas*

Following resin extraction and PCB swelling, we will mill the residual PCB fragments in a controlled milling setup. A design-of-experiments (DOE) approach will be used to tune milling: rotational speed, time, and the addition of other material (e.g., silicone oil, ceramic beads, aluminium powder) to achieve target uniformed particle size distributions (2–10 mm) with minimal energy input. During this step, we will investigate the relationship between specific energy input and degree of metal liberation vs. fines generation; the optimum feed size distribution for downstream separation; effects of milling additives on particle morphology and uniformaty.

Post-Mill Separation will be done by employing these steps—magnetic, eddy-current, electrostatic, and density separation—designed to fractionate ferrous, non-ferrous, and non-metallic streams. They will be used all together or in predetermined combination. We will optimize field strengths, rotor and belt speeds, voltages, and media densities to maximize recovery rates of each

fraction. The biggest challanges are the cut-off thresholds for conductivity and density that govern separation efficiency and how residual resin or process control agents influence separation performance.

The last stage in developmental stage is the non-metallic and mixed metal fraction pre-treatment to remove surface coatings, followed by acid leaching (sulfuric/nitric acids, with and without oxidants) to dissolve target metals (Cu, Ni, precious metals). We will model leaching kinetics as a function of pulp density, temperature, and oxidant concentration, and then develop solvent-extraction process and electrowinning cells to recover valuable metals. This stage is the most complicated as the PCBs have already passed all the separation stages. The extraction selectivity for multi-metal mixtures under realistic conditions is currently under investigation and proves to be the hardest part (combining economical and safe process).

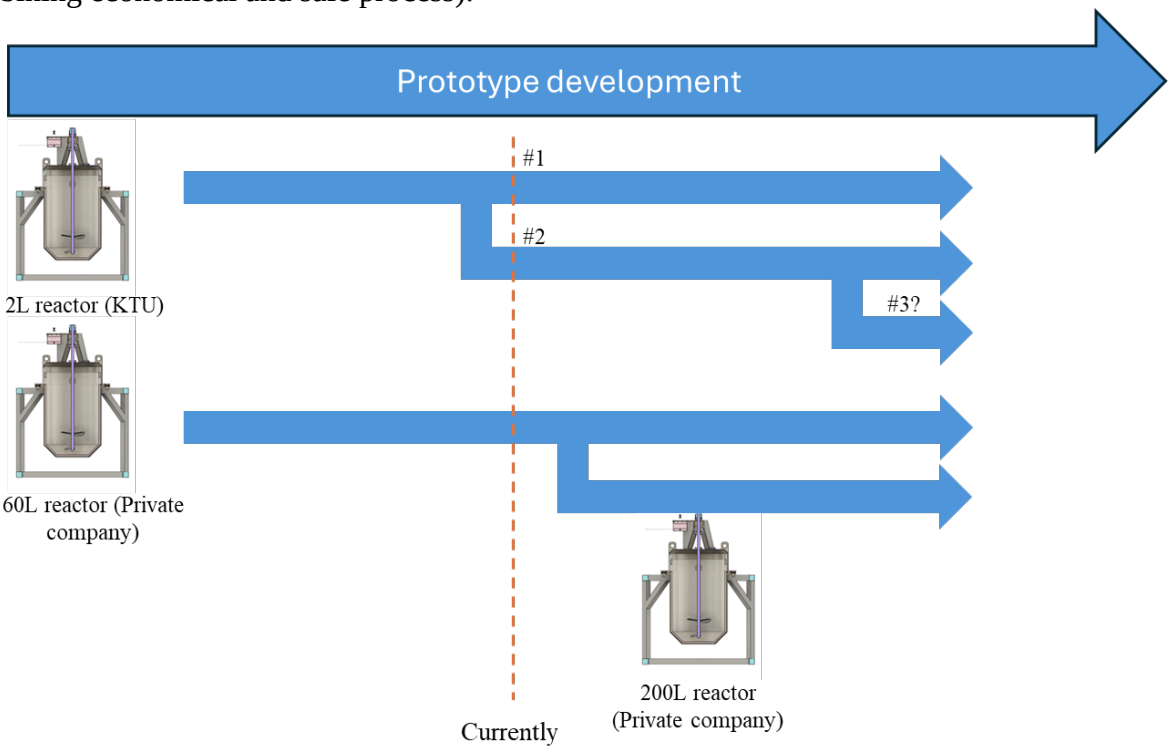


Figure 3. *Current state of prototype development*

Currently, we have developed 2 prototype reactors: 2L reactor at Kaunas University of Technology (KTU) and 60L at private entity. KTU is undergoing a testing of a third prototype model and it's testing. To translate laboratory results to a continuous process, we will design and test reactors at laboratory (2 L) and pilot (60 L) scales under geometric similitude. We will integrate programmable logic controller (PLC) systems for real-time monitoring and control of pH, temperature, and other sensors to evaluate the upscale of the PCB recycling process. The private entity engaged in 200L reactor design and manufacturing. These steps will encounter usuual scale-up hydrodynamics challanges - mixing times, power-to-volume scaling, fluid dynamics, and etc.

As seen in other research, the reduction of PCB is key in „releasing" the metal particles from PCB. Grinding and milling PCB to small particles increases the recovery rate, but also removes the valuable metals from the process (those metals stick to surfaces or lost during the process) [10]. Our studies showed that diffrent delamination process of PCBs have vastly different outcomes (Picture 4), even though A1 and A2 are the same PCB type. Delamination of PCBs might reduce the need for

physical milling to small particles, thus eliminating the possible lost of valuable material and having a better economical payback.

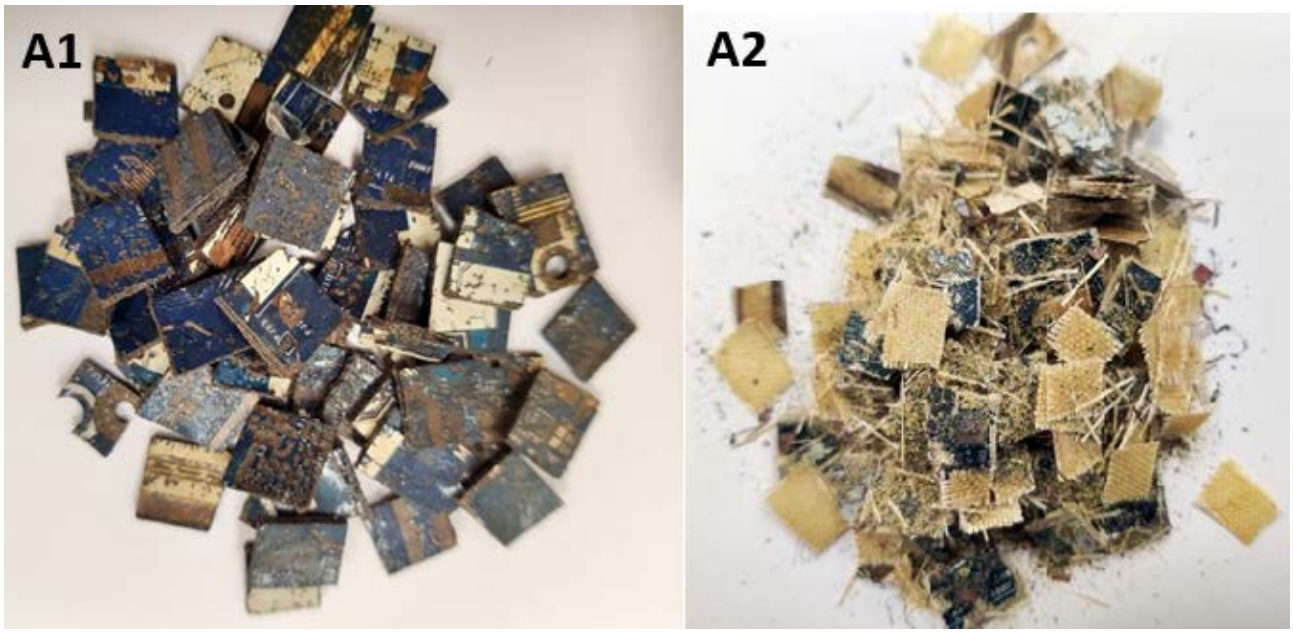


***Figure 4**. A1 - Sample after heating in DMSO in ultrasound bath at 70°C for 56 h. A2 - Sample after heating in DMSO at 140°C for 6 h*

Moveover, recovered resins (Fig. 5) could have a secondary use. Recovered resins have polymeric chains, that can be broken down into monomer, chemically alterted with an active group and reused in different application. For example resin 3D printing, where only the structure of the 3D model is important, not the other properties.

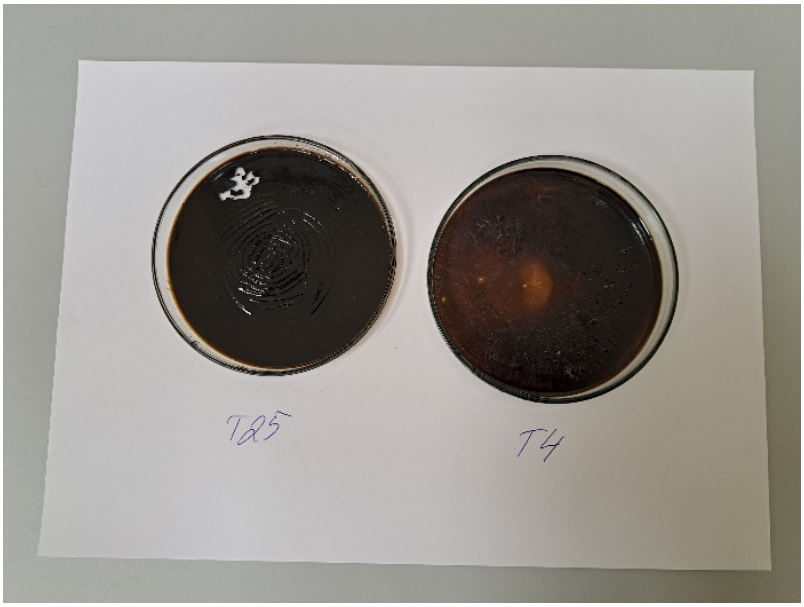


***Figure 5.** Extracted resins from RAM PCBs*

Conclusions

This work establishes first steps for a modular framework for the sustainable recycling of waste printed circuit boards (WPCBs) using solvent-based delamination, controlled mechanical treatment, multi stage physical separation, and hydrometallurgical recovery of metals. It is demonstrated that organic solvent extraction using dimethyl sulfoxide (DMSO) is an effective alternative to traditional thermal and mechanical methods for separating resins from fiberglass and embedded metals. The recyclability of DMSO further supports its use in a closed-loop system, aligning with circular economy principles.

Optimization of the milling process will enable precise control over particle size distribution and energy consumption while minimizing metal losses. The application of magnetic, eddy-current, electrostatic, and density separation effectively fractionates the processed material into ferrous, non-ferrous, and non-metallic streams with high purity and recovery rates. The hydrometallurgical extraction of mixed metal residues—via alkali pretreatment, acid leaching, solvent extraction, and electrowinning—allows selective recovery of high-purity metals under controlled operating conditions.

Scale-up from laboratory (2 L) to pilot (60–200 L) reactors under geometric similitude demonstrates the technical feasibility of translating batch laboratory processes into continuous, automated recycling operations. Integration of programmable logic controllers (PLC) for real-time monitoring and process control ensures reproducibility, safety, and adaptability of the developed system.

This study provides first steps towards an experimentally validated pathway toward a circular, energy-efficient, and environmentally responsible PCB recycling process. The approach minimizes secondary waste, maximizes material recovery, and lays the groundwork for industrial-scale implementation of solvent-based delamination and hydrometallurgical recovery technologies. Future research should focus on long-term solvent stability, kinetic modeling of metal extraction from complex residues, and the valorization of recovered polymeric fractions for high-value applications.

References

1. Venkatesan, K., Ramanathan, K., Vijayanandh, R., Selvaraj, S., Kumar, G. R., & Kumar, M. S. (2020). Comparative structural analysis of advanced multi-layer composite materials. Materials Today: Proceedings, 27, 2673–2687.
2. A Guide to Printed Circuit Board (PCB) Material. (n.d.). Retrieved May 19, 2025, from https://www.nextpcb.com/blog/pcb-material#
3. Aviño-Salvado, O., Sabbah, W., Buttay, C., Morel, H., & Bevilacqua, P. (2017). Evaluation of Printed-Circuit Board Materials for High-Temperature Operation. Journal of Microelectronics and Electronic Packaging, 14(4), 166–171.
4. Zhou, X., Guo, J., Lin, K., Huang, K., & Deng, J. (2013). Leaching characteristics of heavy metals and brominated flame retardants from waste printed circuit boards. Journal of Hazardous Materials, 246, 96–102.
5. Basics of PCBs (What is PCB, Types of PCB, PCB Materials & PCB Software). (n.d.). Retrieved May 19, 2025, from https://circuitdigest.com/tutorial/basics-of-pcb
6. Printed Circuit Boards: Different Types & Their Working. (n.d.). Retrieved May 19, 2025, from https://www.elprocus.com/different-types-printed-circuit-boards/
7. PCB Manufacturing and Assembly Services All in One Place | PCBCart. (n.d.). Retrieved May 19, 2025, from https://www.pcbcart.com/

8. Yousef, S., Tatariants, M., Bendikiene, R., Kriūkienė, R., & Denafas, G. (2020). A new industrial technology for closing the loop of full-size waste motherboards using chemical-ultrasonic-mechanical treatment. Process Safety and Environmental Protection, 140, 367–379.

9. Monteiro, B., Martelo, L. M., Sousa, P. M. S., Bastos, M. M. S. M., & Soares, H. M. V. M. (2021). Microwave-assisted organic swelling promotes fast and efficient delamination of waste printed circuit boards. Waste Management, 126, 231–238.

10. Nekouei, R. K., Pahlevani, F., Rajarao, R., Golmohammadzadeh, R., & Sahajwalla, V. (2018). Two-step pre-processing enrichment of waste printed circuit boards: Mechanical milling and physical separation. Journal of Cleaner Production, 184, 1113–1124.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ СИРОВИНИ З БАГАТОШАРОВИХ КОМПОЗИТІВ

Гитіс МІЛЯУСКАС
Каунаський технічний університет
K. Donelaičio g. 73, Kaunas, Литва

Гінтарас ДЕНАФАС
Каунаський технічний університет
K. Donelaičio g. 73, Kaunas, Литва
https://orcid.org/0000-0002-6834-1026

Анотація

У кінці життєвого циклу відпрацьовані друковані плати (WPCBs) становлять як цінне джерело ресурсів — міді, нікелю, дорогоцінних металів і полімерних матеріалів — так і екологічну загрозу у разі захоронення або спалювання. У цій роботі розроблено та оптимізовано модульну замкнену лінію переробки, яка: (1) здійснює деламінацію епоксидної смоли від скловолокна та вбудованих металів шляхом екстракції диметилсульфоксидом (DMSO), порівнюючи традиційне термічне набухання з мікрохвильовою обробкою з метою максимізації виходу смоли, збереження цілісності волокна та оцінки можливості повторного використання розчинника; (2) подрібнює залишкові фрагменти плат у межах експериментального дизайну з налаштуванням розподілу за розміром частинок (2–10 мм) та енергоспоживанням, включаючи оцінку технологічних добавок; (3) фракціонує подрібнений матеріал за допомогою послідовного магнітного, вихрострумового, електростатичного та щільнісного розділення з оптимізацією порогів сепарації та виділенням феромагнітних, кольорових і неметалевих компонентів; (4) виконує гідрометалургійну екстракцію зі змішаної металевої фракції, включаючи лужну підготовку, кислотне вилуговування (з використанням окисника), екстракцію розчинником та електровідновлення для отримання металопродуктів високої чистоти; (5) масштабує оптимізовані процеси з лабораторного рівня (2 л) до напівпромислового (200 л) у змішуваних реакторах із дотриманням геометричної подібності. У підсумку виконано масові та енергетичні баланси, передбачено замкнені цикли використання розчинника та води. Системно досліджено ключові технічні невизначеності, включаючи селективність розчинник–смола, компроміси між енерговитратами на подрібнення та вивільненням компонентів, кінетику вилуговування з комплексних залишків, гідродинаміку масштабування та втрати при регенерації розчинника. Отримана платформа є перспективним рішенням для циркулярної та стійкої переробки друкованих плат із мінімізацією відходів і максимальним відновленням ресурсів.

Ключові слова: циркулярна економіка, органічна екстракція, переробка друкованих плат, гідрометалургійна екстракція, проєктування прототипу.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330323

IMPROVING THE MOISTURE RESISTANCE OF RECYCLED PAPER

Yevhenii MUKALO[1], Vita HALYSH[1,2]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv 03056, Ukraine
[2]*Chuiko Institute of Surface Chemistry, NAS of Ukraine*
17 Oleha Mudraka Str., Kyiv 03164, Ukraine
e-mail: mukalo.evgen@gmail.com

Abstract

Wet strength is a critical property of paper, ensuring structural integrity under moist conditions. A modified cationic polyacrylamide was synthesized to enhance fiber bonding. Laboratory paper sheets treated with modified product with dosages of 2.10–2.52 kg/t showed optimal dry and wet tensile strength. However, pH variations in recycled pulp, especially alkaline conditions caused by calcium carbonate fillers, can reduce additive effectiveness by hydrolyzing aldehyde groups. The study found product performs best at pH 5.5–6.5, without altering the pulp's initial pH. It shows potential for temporary moisture resistance, with further improvements needed for high-pH environments.

Key words: *glyoxal, polyacrylamide, paper, polymer, water resistance.*

One of the most valued properties of paper products is their wet strength, which refers to the paper's ability to retain its structure and mechanical integrity when exposed to moisture. This property is especially crucial for products like tissues, packaging materials, labels, and technical papers that are expected to perform under humid or wet conditions. Without adequate wet strength, paper tends to weaken, disintegrate, or lose its original form when moistened. To achieve the desired wet strength, special polymeric additives are incorporated during the papermaking process, primarily at the "wet end," where the pulp is still in a slurry form. These wet-strength agents function by forming strong chemical bonds - often covalent - between the cellulose fibers, reinforcing the internal structure of the paper. As a result, the finished product gains not only water resistance but also improved dimensional stability and mechanical durability [2].

The reinforcing mechanism is primarily based on the agent's ability to chemically interact with cellulose or hemicellulose, forming strong covalent bonds between the polymer molecules and the fibers. These bonds complement the natural hydrogen interactions present in dry paper, significantly enhancing the overall wet strength. Because covalent bonds are not disrupted by water, they provide lasting resistance to moisture. This mechanism likely also involves some degree of polymer crosslinking, which creates an additional internal network that further reinforces the paper structure.

Within the protective mechanism, the polymer disperses across the fiber surfaces and crosslinks to form a water-insoluble three-dimensional network. This network envelops fiber contact points,

penetrates the interfiber spaces, and prevents fiber separation upon rewetting. As a result, the paper retains a portion of its original strength even after exposure to water.

In a study conducted at the Department of Ecology and Plant Polymer Technologies, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, a modified cationic polyacrylamide (MCP) was synthesized using glyoxal, sodium hydroxide, sulfuric acid, and deionized water. The resulting polymer had a high molecular weight and a moderate cationic charge density, making it suitable for improving fiber bonding in paper. Laboratory paper sheets weighing 75 g/m² were produced and treated with various dosages of MCP: 1.05, 2.10, 2.52, 3.15, and 4.20 kg per ton of absolutely dry fiber. These dosages were introduced directly into the pulp suspension to ensure even distribution and interaction with the cellulose fibers. The mechanical properties of the paper were then tested, both in dry and wet conditions. The findings showed that the best results in terms of tensile strength, both in dry and wet states, were achieved at dosages of 2.10 and 2.52 kg/t. At higher dosages (3.15 and 4.20 kg/t), the improvements plateaued, indicating that the polymer's bonding potential had reached its limit. This highlights the importance of optimizing additive levels-not only for performance but also for cost-effectiveness.

The pH level of recycled paper pulp can vary significantly depending on the chemicals used in the original paper production. For instance, the use of calcium carbonate as a filler in primary paper manufacturing often results in an alkaline pH in the recovered fibers. These pH fluctuations are not merely a byproduct of recycling - they can have a profound impact on the effectiveness of chemical additives, particularly those aimed at improving wet strength.

When the pH becomes too high, hydrolysis of aldehyde groups within the additives, such as modified polyacrylamides, may occur. This reaction reduces their ability to form stable covalent bonds with cellulose fibers, weakening the fiber network and undermining the desired reinforcement. Therefore, the ability of wet-strength agents to perform optimally depends strongly on the pH of the pulp suspension during processing.

To better understand this effect, a study was conducted to evaluate the influence of environmental pH on the physical and mechanical properties of paper produced with MCP (Fig.1).

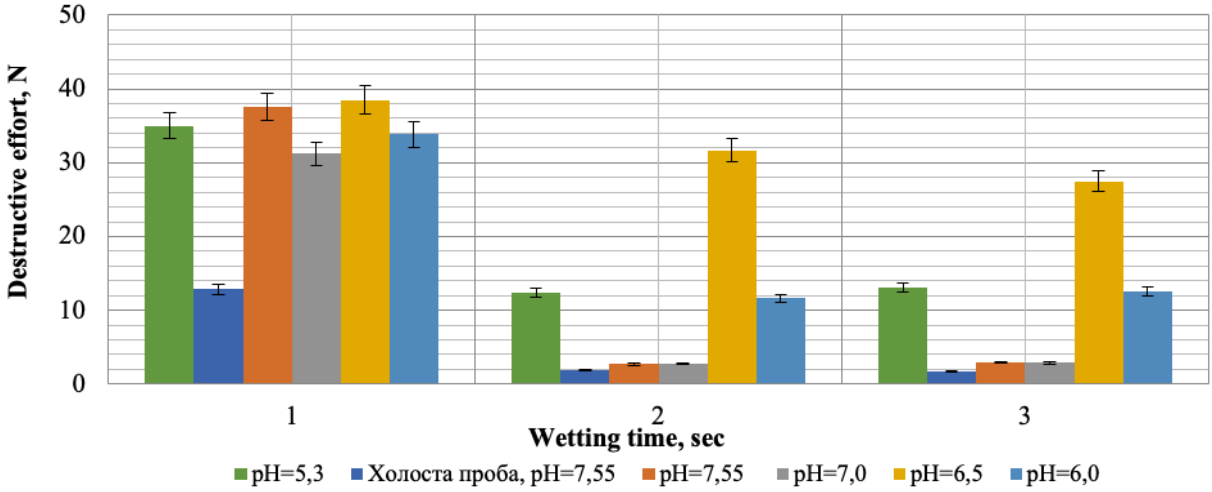


***Figure 1**. Effect of pH on the mechanical strength of paper samples*

Thus, the effectiveness of MCP depends on the pH of the medium and is optimal in the range of 5.5–6.5. Adding the polymer to the waste paper pulp in a given amount does not change the hydrogen index of the waste paper pulp. MCP is a promising agent for providing temporary moisture resistance of paper, especially when produced from waste paper. Further research should be aimed at improving

the polymer structure (crosslink density, molecular weight) to achieve better characteristics at pH > 7, which is relevant for paper and grades containing calcium carbonate filler.

References

1. Tedeschi, A.M.; Di Caprio, F.; Piozzi, A.; Pagnanelli, F.; Francolini, I. Sustainable bioactive packaging based on thermoplastic starch and microalgae. *Int. J. Mol. Sci*. **2021**, 23, 178. https://doi.org/10.3390/ijms23010178

2. Zhao, M.; Robertsén, L.; Wågberg, L.; Pettersson, T. Adsorption of paper strength additives to hardwood fibres with different surface charges and their effect on paper strength. *Cellulose* **2022**, 29, 2617–2632. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04447-3

ПОКРАЩЕННЯ ВОЛОГОСТІЙКОСТІ МАКУЛАТУРНОГО ПАПЕРУ

Євгеній МУКАЛО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0001-2602-0689

Віта ГАЛИШ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України
вул. Олега Мудрака, 17, м. Київ, 03164, Україна
https://orcid.org/0000-0001-7063-885X

Анотація

Влогостійкість є критично важливою властивістю паперу, що забезпечує структурну цілісність у вологих умовах. Для покращення зв'язування волокон було синтезовано модифікований катіонний поліакриламід. Зразки лабораторного паперу, оброблені модифікованим продуктом у дозуванні 2,10–2,52 кг/т, показали оптимальну міцність на розтяг у сухому та вологому стані. Однак коливання pH макулатурної маси, особливо лужні умови, спричинені наповнювачами на основі карбонату кальцію, можуть знизити ефективність добавок шляхом гідролізу альдегідних груп. Дослідження показало, що продукт найкраще працює при pH 5,5–6,5, не змінюючи початкового pH маси. Він демонструє потенціал для забезпечення тимчасової вологостійкості, з подальшими покращеннями, необхідними для середовищ з високим pH.

Ключові слова: гліоксаль, поліакриламід, папір, полімер, водостійкість.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331645

PROCESSING OF CARBON-CONTAINING WASTE FOR THE PRODUCTION OF GASEOUS FUELS

Denys NEVCHAS, Kostyantyn PYANYKH
The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine
e-mail: pyanykh67@gmail.com

Abstract

The paper describes the laboratory stand of the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, designed for gasification of hydrocarbon-containing waste and presents the results of their work. The possibility of producing gaseous fuels for replacing natural gas in fuel-using units is shown.

Key words: *waste recycling, gasification, substitution of fossil fuels, thermal destruction.*

Waste generation accompanies most types of societal activity. Those types of waste for which effective recycling technologies have been developed for beneficial use become a resource. Thus, the creation of a technology aimed at the beneficial utilization of waste provides a dual effect when implemented.

At the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, work is being conducted on the gasification of waste of various origins and physical states, with the aim of producing combustible gases—both as a resource for thermal equipment and for supporting chemical transformations.

The gasification of liquid hydrocarbons enables the processing of liquid waste from sunflower oil production, including soapstock, hydrofuze, tank sediment, and foots. The volume of such waste reaches up to 7,000 tons per year. The energy potential of these effluents—currently requiring resource-intensive treatment—could substitute approximately 840,000 m³ of natural gas annually [1]. The economically justified energy potential of solid agricultural waste exceeds 11 million tons of oil equivalent [2]. Other significant resources for processing include dried sludge from wastewater treatment, used car tires, and more. [3,4]

Main goal of this research was to develop waste processing technologies to realize the energy potential of wastes. To achieve this goal, a series of test rigs has been created at the Institute, enabling the thermal destruction of carbon-containing feedstock under conditions of air and oxygen-enriched air blasting. The processing of liquid waste is carried out using a stand designed for studying the process of plasma reforming of waste (Figures 1, 2).

The working section of the stand (Figure 1) consists of a cylindrical metal discharge chamber and a sealed metal reaction chamber isolated from the atmosphere. A cylindrical T-shaped electrode (1) is inserted into the chamber through a dielectric sleeve (2) located in the upper metal flange. This electrode functions as the anode and is supplied with a high energy potential. The anode's vertical position can be adjusted, allowing the distance between the electrodes to vary from a minimum of 2

mm to a maximum of 10 mm. The flange (3) serves as a grounded cathode. A spark discharge is initiated between the T-shaped cylindrical electrode (1) and the upper metal flange (3), which has a replaceable sleeve (4) in its center; the discharge end slides through an opening in this sleeve.

The oxidizer is injected under high pressure through channel (5), where calibrated nozzles are installed tangentially to the reaction chamber wall, creating a vortex flow (6) directed toward the spark discharge. The plasma jet (7) enters the reaction chamber (8). Two thermocouples are mounted on the outer wall of the working chamber—one at the top, one at the bottom—to measure wall temperature: T_t (wall temperature at the top) and T_β (wall temperature at the bottom). The hydrocarbon-steam mixture is fed through opening (9), and the oxidizer through opening (10). As in the spark discharge chamber, material flows are tangentially injected at high pressure into the working chamber via channels (11) with nozzles, forming a reverse vortex flow (12). Centrifugal force drives the mixture of hydrocarbons, steam, and oxidizer along the wall to the upper part, where oxidizer activated by the spark discharge is introduced.

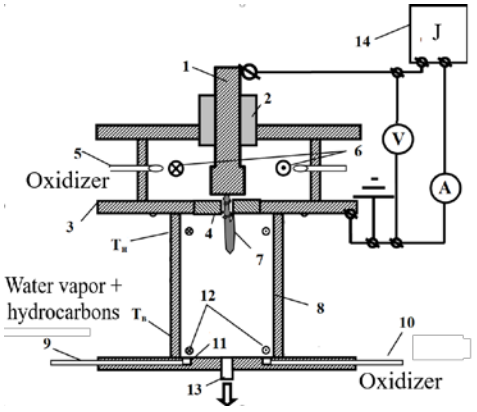


Fig. 1. *Schematic diagram of the working section of the plasma reforming unit for liquid carbon-containing waste*

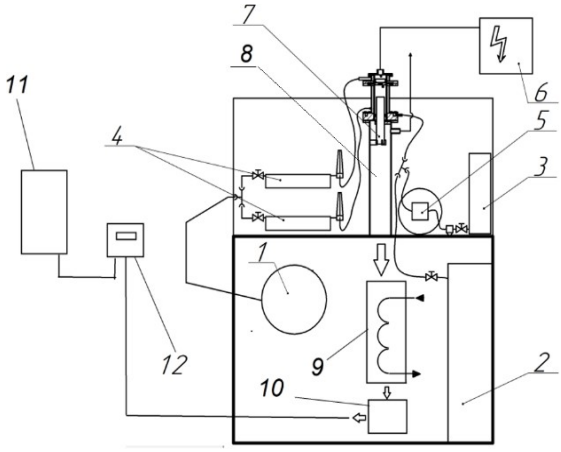


Fig. 2. *Schematic diagram of the plasma hydrocarbon gasification stand*

The mixture then slows down and is displaced toward the central axis of the reaction chamber, descending with the oxidizer flow. The resulting gaseous gasification products exit the working chamber through opening (13) for further use.

The process is stabilized by the high-voltage transformer (14), the power pulse of which can be adjusted to influence the composition and properties of the gaseous products generated from hydrocarbon oxidation.

Designation on Figure 2: 1 – air compressor; 2 – steam superheater; 3 – hydrocarbon tank; 4 – air receiver tank; 5 – high-pressure pump; 6 – high-voltage transformer; 7 – plasma initiator; 8 – working section of the gasifier; 9 – cooler; 10 – condensate collection chamber; 11 – hot water boiler; 12 – gas meter.

The composition of the producer gas produced from sunflower oil and liquid pyrolysis furnace fuel in the process of thermal decomposition of these liquid hydrocarbons is given in Table 1.

Table 1. Composition of generator gas

Substance	Composition of gaseous fuel									Q_{lower}, MJ/m^3
	H_2	N_2	CO	CH_4	CO_2	C_2H_4	C_3H_8	C_4H_{10}	H_2O	
Sunflower oil, % (vol.)	7,8	40,91	11,15	7,67	23,6	2,87	0,82	1,22	2,41	8,89
Stove fuel, % (vol.)	9,2	34,31	14,46	9,14	19,72	4,04	3,67	0,44	3,34	13,75

The conducted studies on liquid fuel reforming have shown the following:

- the calorific value of the producer gas generated from sunflower oil is 8.89 MJ/m³, and from liquid furnace fuel — 13.75 MJ/m³; the efficiency of the gasification process is 80–84%; the efficiency of thermal energy production by combusting the gaseous fuel in a boiler, after prior gasification of the liquid fuel, does not exceed 72%.
- In comparison with calorific value of natural gas, produced gas, generated from 1 kg of liquid wastes, can replace 0.75 m³of natural gas. Thus, creating a way to realize the energy potential of liquid wastes.
- With the help of synthesis gas, it is possible to replace natural gas or part of it in existing water heating boilers; heat up boilers during the start-up of a thermal power plant in order to save on more expensive energy carriers; replace part of the natural gas used in boiler rooms; increase the combustion efficiency of traditional fuels.

References

1. Mahlovanyiĭ Ye.V., Nevchas D.M., Pyanykh K.Ye. Processing of liquid high-energy products to produce gas mixtures of a given composition. // «Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia», №4, 2023, page.113–123. DOI: 10.33070/etars.4.2023.09.
2. Tetiana Zhelezna, Assessment of the total energy potential of biomass in Ukraine // International Technical Assistance Project "Economic Support to Eastern Ukraine" Online training on the energy potential of biomass for the production of 1st and 2nd generation motor biofuels, October 3, 2023. Chrome extension: //efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/ https://uabio.org/wpcontent/uploads/2023/10/ZHelyezna_Seminar-USAID_03-10-2023.pdf.
3. Wang, B.; Gupta, R.; Bei, L.; Wan, Q.; Sun, L. A review on gasification of municipal solid waste (MSW): Syngas production, tar formation, mineral transformation and industrial challenges. Int. J. Hydrogen Energy 2023, 48, 26676–26706.
4. Lee, D.-J. Gasification of municipal solid waste (MSW) as a cleaner final disposal route: A mini-review. Bioresour. Technol. 2022, 344, 126217.

ПЕРЕРОБКА ВУГЛЕЦЕВМІСНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

Денис НЕВЧАС
Інститут газу Національної академії наук України
вул. Дегтярівська, 39, 03113, Київ, Україна
https://orcid.org/0009-0003-5092-3030

Костянтин П'ЯНИХ
Інститут газу Національної академії наук України
вул. Дегтярівська, 39, 03113, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-0158-4696

Анотація
У статті описано лабораторний стенд Інституту газу Національної академії наук України, призначений для газифікації вуглеводневмісних відходів та представлено результати його роботи. Показано можливість виробництва газоподібного палива для заміщення природного газу в паливовикористовуючих установках.

Ключові слова: переробка відходів, газифікація, заміщення викопного палива, термічна деструкція

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330248

КАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ МАРКИ ЕГСП У ГІДРУВАННІ ПОТРІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ С-С

Кирил НОСАЧОВ[1], Ігор БИЧКО[2], Андрій ВАГІН[3], Олена ІВАНЕНКО[1]
[1]*Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського*
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
[2]*Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського*
проспект Науки, 31, м. Київ, 03028, Україна
[3]*Приватне акціонерне товариство «Український графіт»*
Північне шосе, 20, Запорізька обл., м. Запоріжжя 69006, Україна
e-mail: liriklirik886@gmail.com

Анотація

У роботі представлено результати дослідження каталітичних властивостей графітового електроду марки ЕГСП у гідруванні 4-фторфенілацетилену. Досліджено структурні характеристики графіту за допомогою рентгенофазового аналізу та методу адсорбції-десорбції азоту. Показано, що досягається конверсія 4-фторфенілацетилену становить 86,7 %.

Ключові слова: *каталіз, селективність, гідрування, графіт.*

Впровадження нових екологічних процесів є постійною потребою хімічної промисловості. Відповідно, принципово важливим є підхід до планування технологічних процесів спрямованих на запобігання утворенню відходів ще на етапі проектування виробничих ліній. Відомо, що у каталітичних процесах гідрування широко використання знаходять каталізатори на основі благородних металів таких як платина, при чому типовий вміст благородних металів в таких каталізаторах менше 1% мас. [1]. Застосування таких каталізаторів, є не тільки суттєвим чинником у ціноутворенні кінцевого продукту, а й призводить до значного екологічного навантаження у зв'язку з потребою переробки каталізаторів з метаю вилучення дорогоцінних металів, а також з потребою додаткової очистки від домішок металів, які завжди забруднюють кінцевий продукт. Використання гетерогенних каталізаторів на базі вуглецевих матеріалів може стати альтернативним рішенням, оскільки дозволяє значно здешевити собівартість отриманої продукції, так і уникнути забруднень важкими металами. Зокрема, одним з подібних виробництв є виробництва сполук з ненасиченим подвійним зв'язком, в яких одержання цільових продуктів досягається шляхом гідрування відповідних ацетиленових похідних [2].

Метою роботи було встановлення можливості використання каталізаторів на основі графітових електродів марки ЕГСП, що виробляється компанією УКРГРАФІТ, у селективному гідруванні потрійних зв'язків вуглець-вуглець в органічних сполуках.

У дослідженні використовувався графіт марки ЕГСП — промисловий матеріал, який зазвичай застосовується в процесах плавлення та електролізу. Для визначення його каталітичних властивостей зразок було подрібнено в лабораторній ступці до дрібнодисперсного стану з розміром частинок менше ніж 100 мікрон.

З метою визначення структурних характеристик відповідного графіту було проведено аналіз зразка на порошковому рентгенівському дифрактометрі D8 ADVANCE, Bruker AXS з використанням Cu Kα випромінювання λ = 0,15418, за напруги 40 кВ і струмі 40 мА**.** Рентгенограма графіту ЕГСП представлена на рис. 1.

При цьому міжплощинну відстань *d* було розраховано за рівнянням Брегга:

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \text{ (1)},$$

де θ – кут ковзання (бреггівський кут), n – порядок дифракційного максимуму, λ – довжина хвилі (Cu *Ka* 1,540 52 Å).

Товщину перекривних графітових структур у графіті ЕГСП (розмір кристалів вздовж осі с) $L^{XRD}{}_c$, розраховували за даним рентгеноструктурного аналізу за рівнянням Шеррера:

$$L^{\mathrm{XRD}}{}_c = \frac{K_{002}\lambda}{\beta_{002}\cos\theta_{002}} \text{ (2)},$$

де K_{002} = 0,89 – стала Воррена дископодібних частинок у напрямку базальної площини; λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, нм; β_{002} – ширина лінії (002) на напіввисоті висоті (FWHM), радіани кута 2θ; θ_{002} – кут дифракції, що відповідає максимуму лінії (002), градуси.

Виходячи з рівнянь 1, 2 визначали кількість шарів N_c вздовж осі с:

$$N_c = \frac{L^{\mathrm{XRD}}c}{d_{002}} \text{ (3)},$$

де $L^{XRD}{}_c$ - товщина перекривних графітових структур, d_{002} - міжплощинна відстань.

Розмір кристалітів вздовж латерального напрямку (осі а) графіту ЕГСП $L^{XRD}{}_a$ було розраховано за допомогою РФА за рівнянням:

$$L^{\mathrm{XRD}}{}_a = \frac{K_{100}\lambda}{\beta_{100}\cos\theta_{100}} \text{ (4)},$$

де K_{100} = 1,84 - стала Воррена дископодібних частинок у напрямку бічної площини; β_{100} - ширина лінії (100) на напіввисоті, кут 2θ в радіанах.; θ_{100} - кут дифракції, що відповідає максимуму лінії (100) [3].

Результати визначення внутрішньої структури графітових електродів марки ЕСПГ представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Структурні характеристики графіту ЕГСП

Рефлекси	**d, (Å)**	**2θ**
1	3,7020	24,05
2	3,3448	26,65
3	2,1279	42,45
4	2,0334	44,6
5	1,7403	52,65
6	1,6787	54,65
7	1,5432	59,85
8	1,1076	77,55
9	1,1547	83,65
10	1,1205	87,05

Аналіз одержаних результатів показав, що $L^{\mathrm{XRD}}{}_a$ становить 9 нм, $L^{\mathrm{XRD}}{}_c$ = 23 нм, та N_c = 7 нм.

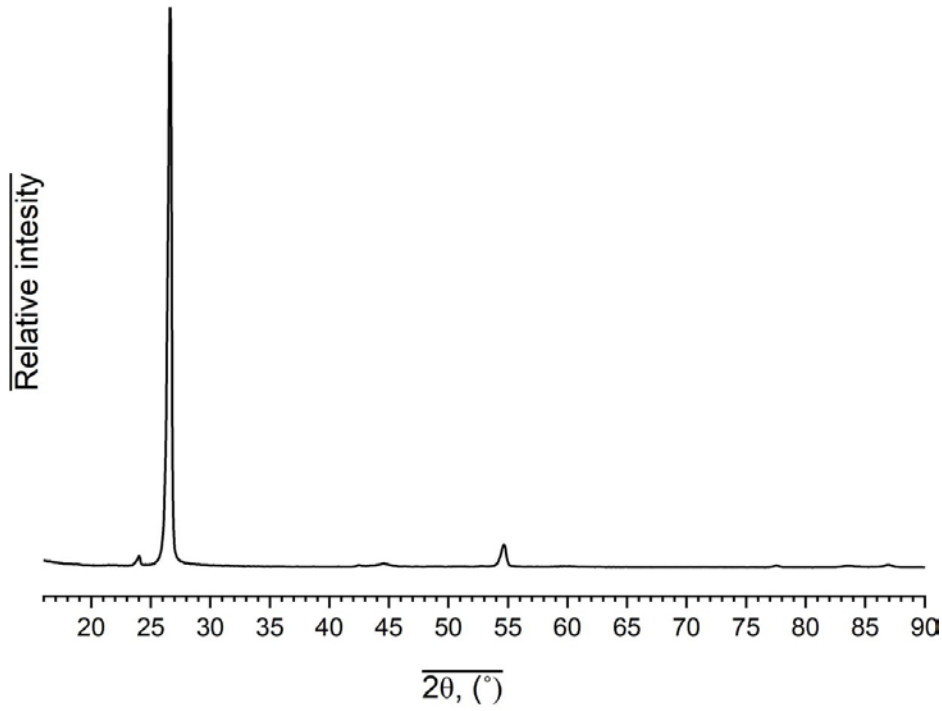


Рисунок 1. *Рентгенівська дифрактограма графіту ЕГСП*

Ізотерми адсорбції-десорбції азоту одержували з використанням пористих матеріалів Sorptomatic 1990 (Thermo Electron Corp.) за −196 °C, та 1 бар. Зразки попередньо вакуумували (P = 0,7 Па) за 200 °C протягом 5 годин. Питому площу поверхні та криву розподілу пор за розмірами розраховували методом Брунауера-Еммета-Теллера (BET) [3]. Аналіз BET ізотерми (рис. 2) адсорбції показав, що питома площа поверхні становить 13,059 м²/г, об'єм пор за методом t-Plot близький до нуля.

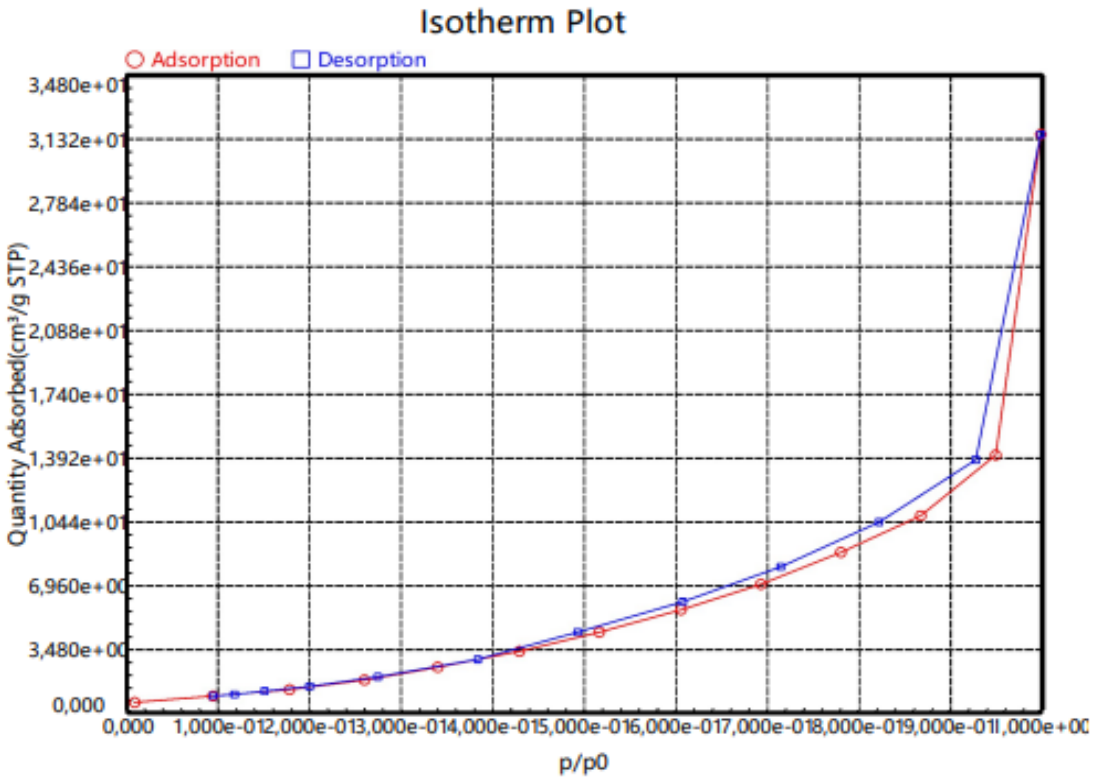


Рисунок 2. *Ізотерма адсорбції (червона крива) – десорбції (синя крива) азоту на графіті ЕГСП*

Дослідження каталітичної активності дрібнодисперсного графіту в реакції гідрування 4-фторфенілацетилену (рис.3) проводили в рідкій фазі в реакторі високого тиску з магнітною мішалкою та тефлоновою вставкою. Процес проводили наступним чином. До 10 мг каталізатора в 10 мл гексану додавали 183 мкмоль 4-фторфенілацетилену. Потім суспензію тричі продували воднем для видалення повітря, та збільшили тиск водню до 45 бар (4,5 МПа). Реакцію проводили в температурному інтервалі від 25°С до 145°С протягом 24 годин. Після завершення реакції каталізатор та розчин розділяли центрифугуванням. Продукти реакції аналізувалися газовою хроматографією з мас-спектрометричним детектором. Результати експериментів представлені в таблиці 2.

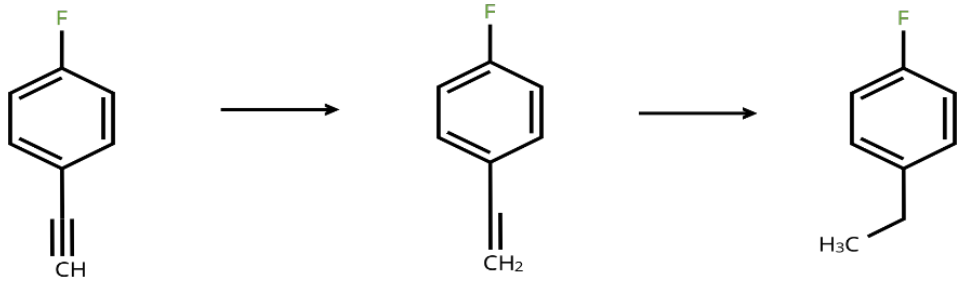


Рисунок 3. *Схема гідрування 4-фторфенілацетилену*

Таблиця 2. Залежність селективності і виходу продукту каталітичної конверсії 4-фторфенілацетилену за різних температур

Маса графіту ЕГСП, г		0,0104	0,0102	0,011	0
Маса C_8H_5F, мкмоль		183	183	183	183
T, °C		145	100	25	145
Конверсія C_8H_5F, %		86,66	55,34	0,43	0
Селективність	**C_8H_7F, %**	61,07	92,46	69,96	0
	C_8H_9F, %	38,93	7,54	30,04	0
Вихід	**C_8H_7F, %**	52,92	51,17	0,3	0
	C_8H_9F, %	33,74	4,18	0,13	0

Конверсія *C* розраховувалась за формулою:

$$C = \frac{N_0 - N}{N_0} \cdot 100\% \ (5),$$

де N_0 – моль речовини, що надійшло в реактор, N – моль речовини, що прореагувало.

Селективність *S* розраховувалась за формулою:

$$S = \frac{N_j}{\sum N_i} \cdot 100\% \ (6),$$

де N_j - кількість моль продукту j, $\sum N_i$ – сумма кількості моль всіх продуктів.

Вихід η розраховувався за формулою: $\eta = C \cdot S \cdot 100\% (7)$.

Висновки

Встановлено, що за температури 145 °C вихід 4-фторстиролу становить 52,9 %. Проведення холостого експерименту засвідчило, що за відсутності каталізатора реакція гідрування потрійних зв'язків не відбувається. Порівняння отриманих результатів із відомими з літератури даними щодо паладійвмісного каталізатора Ліндара [4], який є типовим для таких реакцій, показало, що останній забезпечує значно вищі виходи вже за умов 4 бар та 40 °C. Таким чином, каталізатор Ліндара є істотно ефективнішим за графіт.

Отже, результати проведеного дослідження свідчать, що застосування товарного графіту марки ЕГСП не дозволяє досягти ефективності каталітичного перетворення, співставної з комерційним каталізатором. Водночас можна припустити, що зміна розчинника, введення добавок до реакційної суміші, а також модифікація та збільшення площі поверхні графіту можуть у перспективі забезпечити створення ефективного й стабільного каталізатора для селективного гідрування ацетиленових похідних до відповідних сполук із ненасиченим подвійним зв'язком.

Література

1. Mengmeng Liu, Liu Zhou, Xianjin Luo, Chao Wan, Lixin Xu Recent Advances in Noble Metal Catalysts for Hydrogen Production from Ammonia Borane **(2020)**, https://doi.org/10.3390/catal10070788

2. The Impact of Nanoscience on Heterogeneous Catalysis, Alexis T. Bell, **(2003)**, DOI: 10.1126/science.1083671

3. Igor Bychko, Alexander Abakumov , Olga Didenko , Mengyao Chen , Jianguo Tang , Peter Strizhak, Differences in the structure and functionalities of graphene oxide and reduced graphene

oxide obtained from graphite with various degrees of graphitization, **(2022)**, doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110614

4.Gregor Wowsnick , Detre Teschner , Marc Armbrüster , Igor Kasatkin , Frank Girgsdies , Yuri Grin , Robert Schlögl , Malte Behrens Surface dynamics of the intermetallic catalyst Pd2Ga, Part II – Reactivity and stability in liquid-phase hydrogenation of phenylacetylene, (2014), https://doi.org/10.1016/j.jcat.2013.09.018

CATALYTIC POWER OF GRAPHITE ELECTRODES OF SLGE GRADE AT HYDRUVANCY TRIPLE CONNECTIONS C-C

Kiril NOSACHOV
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv 03056, Ukraine

Igor BYCHKO
L.V. Pysarzhevskii Institute of Physical Chemistry
of National Academy of Science of Ukraine
Prospekt Nauky, 31, Kyiv 03028, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4164-3024

Olena IVANENKO
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6838-5400

Andrii VAHIN
PJSC "UKRGRAPHITE",
Pivnichne shose, 20, Zaporizhzhia, Zaporizka obl. 69006, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-1234-0753

Abstract

The paper presents the results of the study of the catalytic properties of the SLGE graphite electrode in the hydrogenation of 4-fluorophenylacetylene. The structural characteristics of graphite were studied using X-ray phase analysis and the nitrogen adsorption-desorption method. It was shown that the achieved conversion of 4-fluorophenylacetylene is 86.7%.

Keywords: catalysis, selectivity, hydrogenation, graphite.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329147

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТОНКО ПОДРІБНЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОНЦЕНТРАТІВ

Андрій ПЕТЕЛЬКА, Людмила СКЛЯР
Криворізький національний університет
вул. Віталія Матусевича , 11, 50027 м. Кривий Ріг, Україна
e-mail: andrey.petelka@knu.edu.ua

Анотація

Дослідження присвячено підвищенню енергоефективності зневоднення тонко подрібнених залізорудних концентратів для виробництва сировини, придатної для технології прямого відновлення заліза (DRI). Метою є порівняння енергоефективності тканинних вакуум-фільтрів ДУ-100-2,5 та керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90, а також визначення оптимальних параметрів роботи останніх для забезпечення масової частки вологи концентрату в межах 9,0 – 9,5% при мінімальних енергетичних витратах. Експерименти, проведені на ПРАТ «ЦГЗК», показали, що керамічні фільтри забезпечують продуктивність 0,7 – 0,9 т/м² і знижують енергоспоживання завдяки капілярній дії мікропор та ефективній регенерації. Наукова новизна полягає у розробці математичної моделі прогнозування залишкової вологи із середньою точністю 0,17% та величиною збіжності 0,9787. Практична значимість полягає у можливості впровадження енергоефективної технології на вітчизняних підприємствах для підвищення конкурентоспроможності на ринках концентратів.

Ключові слова: *енергоефективність, зневоднення, залізорудний концентрат, керамічні вакуум-фільтри, DRI обкотиші, вакуум-фільтрація.*

Вступ

Виробництво високоякісних залізорудних концентратів для технології прямого відновлення заліза (DRI) є важливим завданням для гірничо-збагачувальних підприємств. Зростання вимог до якості сировини, зокрема вмісту заліза (70,0–70,5%) та стабільної залишкової вологи (9,0–9,8%), зумовлює необхідність удосконалення технологій зневоднення. Зневоднення тонко подрібнених концентратів (98–99% класу -0,056 мм) є енергоємним процесом, що суттєво впливає на собівартість продукції. Традиційні тканинні вакуум-фільтри, такі як ДУ-100-2,5, мають високу енергоємність через проникнення повітря крізь фільтрувальну тканину, часте забруднення та потребу регулярної заміни фільтрувальних матеріалів. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90, які використовують капілярну дію мікропор, пропонують енергоефективну альтернативу завдяки стабільності процесу, довговічності та зниженню енергоспоживання. Метою дослідження є аналіз енергоефективності керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 порівняно з тканинними фільтрами ДУ-100-2,5, визначення ключових параметрів, що впливають на енергоспоживання, та розробка рекомендацій для їх

оптимізації. Дослідження проводилися на ПРАТ «ЦГЗК» з акцентом на досягнення стабільної залишкової вологи концентрату, придатної для виробництва DRI обкотишів.

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями

Тонке подрібнення залізорудних концентратів для підвищення вмісту заліза призводить до збільшення питомої поверхні частинок, що ускладнює їх зневоднення. Тканинні вакуум-фільтри ДУ-100-2,5, які широко застосовуються на вітчизняних підприємствах, мають низку недоліків: низька ефективність при обробці тонких класів (-0,056 мм), нестабільна залишкова вологість (вище 9,8%) та високе енергоспоживання через проникнення повітря крізь тканину. Це призводить до додаткових витрат енергії на сушку та ускладнює виробництво сировини для DRI обкотишів, які вимагають чітко контрольованої вологи для забезпечення міцності та зношуваності сирих та обпалених залізорудних обкотишів. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90, завдяки мікропористій структурі пластин, забезпечують ефективне зневоднення за рахунок капілярної дії, що усуває проникнення повітря та знижує енергоспоживання. Дослідження [1] показують, що керамічна фільтрація може зменшити енергетичні витрати на 20–30% порівняно з тканинними фільтрами. Крім того, керамічні фільтри мають вищу довговічність і потребують менше обслуговування, що додатково сприяє економії ресурсів. Основним завданням дослідження є визначення оптимальних параметрів роботи КДФ-90 для мінімізації енергоспоживання при збереженні необхідної якості концентрату.

Методи дослідження

Експериментальні дослідження проводилися на ПРАТ «ЦГЗК» з використанням тонко подрібненого залізорудного концентрату (98–99% класу -0,056 мм, вміст заліза 70,0–70,5%). Порівнювалися два типи обладнання: тканинні вакуум-фільтри ДУ-100-2,5 та керамічні вакуум-фільтри КДФ-90. Основні параметри, що аналізувалися:

– масова частка заліза загального у концентраті;
– масова частка класу -0,056 мм;
– питома поверхня концентрату;
– вакуум у зонах набору та сушки;
– швидкість обертання дисків;
– питома продуктивність.

Для аналізу впливу параметрів на залишкову вологу та енергоспоживання використовувався лінійний аналіз засобами Microsoft Excel. Енергоспоживання оцінювалося через вимірювання потужності вакуумних насосів та частоти їх роботи. Дані порівнювалися з літературними джерелами [1, 2] для підтвердження енергоефективності керамічних фільтрів.

Результати та їх аналіз

Експерименти показали, що керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 забезпечують стабільну продуктивність 0,7 – 0,9 т/м² і залишкову вологу концентрату в межах 9,0 – 9,8%, що відповідає вимогам для виробництва DRI обкотишів. Тканинні фільтри ДУ-100-2,5, навпаки, мали нестабільну вологість (9,8 – 10,9%) і вищі енергетичні витрати через проникнення повітря крізь тканину. Керамічні фільтри знижують енергоспоживання на 15 – 25% завдяки капілярній дії мікропор, яка усуває потребу в додатковому тиску для фільтрації.

Було проведено серію випробувань на керамічних вакуум-фільтрах КДФ-90 з метою прогнозування залишкової вологи концентрату та підвищенню енергоефективності роботи обладнання. Результати випробувань керамічного вакуум-фільтра КДФ-90 наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Результати випробувань керамічного вакуум-фільтра КДФ-90.

Fe заг.	кл. -0,056 мм	Величина вакууму		Швидкість обертання дисків	Питома продуктивність	Питома поверхня концентрату	Залишкова волога концентрату	Розрахункова волога	|Δ|
		зона набору	зона сушки						
$\beta_{заг}$	$\beta_{-0,056}$	$P_{наб.}$	$P_{суш.}$	n	q	SSA	W	W_p	
%	%	бар	бар	об/хв	т/м^2	см^2/г	%	%	
69,41	98,2	0,78	0,85	0,82	0,9980	1870	9,27	9,655	0,385
69,41	98,1	0,77	0,86	0,82	0,9553	2018	10,03	9,662	0,368
69,61	94,2	0,47	0,86	0,83	0,8900	1860	9,50	9,481	0,019
70,40	98,6	0,85	0,74	0,82	1,0870	1959	10,00	9,885	0,115
69,80	95,2	0,85	0,86	0,7	0,8205	1971	9,23	9,32	0,09
69,90	96,6	0,77	0,88	0,77	0,6413	2192	9,43	9,3	0,13
70,31	98	0,77	0,87	0,79	1,1335	2011	9,75	9,84	0,09
70,38	97,8	0,77	0,88	0,85	0,8424	2178	9,66	9,653	0,007
70,87	98,4	0,73	0,86	0,88	0,5053	2082	9,30	9,3	0
70,10	98	0,89	0,87	0,86	0,4806	2083	9,06	9,22	0,16
70,48	99	0,82	0,87	0,88	0,5364	2008	9,08	9,3	0,22
70,59	97,6	0,83	0,87	0,84	0,5170	2054	9,28	9,23	0,05
70,38	98	0,73	0,84	0,73	0,4824	2229	9,10	9,154	0,054
70,97	97,1	0,88	0,71	0,6	1,2335	2119	9,20	9,869	0,669
70,69	99,4	0,89	0,63	0,8	0,9277	2165	9,83	9,855	0,025
70,78	99,2	0,82	0,8	0,83	1,0608	2133	9,93	9,925	0,005
70,68	99,2	0,69	0,81	0,8	0,9410	2101	9,13	9,742	0,612
70,59	98,6	0,89	0,46	0,7	0,9261	1889	9,70	9,699	0,001
70,68	99,1	0,88	0,77	0,7	0,7965	2229	9,60	9,539	0,061
70,98	99,6	0,72	0,85	0,55	0,9045	2006	9,70	9,361	0,339
								Середнє відхилення	0,170
								Стандартне відхилення	0,202
								Збіжність	0,9787

За допомогою інструментів аналізу Microsoft Excel отримано коефіцієнти впливу показників роботи вакуум-фільтра для лінійної залежності прогнозованого рівня залишкової вологи концентрату:

$$W_p = 2{,}71377 \times Fe_{заг} + 1{,}65862 \times \beta_{-0,056} + 1{,}16268 \times n + 1{,}11527 \times q + 0{,}41852 \times SSA + \\ + 0{,}00022 \times P_{наб.} - 0{,}54507 \times P_{суш.} + 3{,}75866;$$

де, $Fe_{заг}$ – масова частка заліза загального у концентраті (%);
$\beta_{-0,056}$ – масова частка класу -0,056 мм (%);
SSA – питома поверхня концентрату (тис. см^2 / г);
$P_{наб.}$, $P_{суш.}$ – вакуум у зонах набору та сушки (бар);
n – швидкість обертання дисків (хв$^{-1}$);
q – питома продуктивність (т/м²·год).

Середнє відхилення розрахункової вологи від фактичної становить 0,17%, величина стандартного відхилення – 0,202%, величина збіжності – 0,9787, що свідчить про високу точність залежності. Графік збіжності розрахункової та фактичної залишкової вологи наведено на Рис. 1.

Рис. 1. *Графік збіжності розрахункової та фактичної залишкової вологи*

Аналіз енергоспоживання показав, що тканинні фільтри витрачають 1,2 - 1,5 кВт·год/т концентрату через необхідність підтримання високого вакууму та часту заміну тканин. Керамічні фільтри знижують ці витрати до 0,9 – 1,1 кВт·год/т завдяки стабільній роботі вакуумних насосів і довговічності пластин. Дослідження [3] підтверджують, що керамічна фільтрація забезпечує економію енергії до 30% при обробці залізорудних концентратів.

Обговорення

Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 мають значні переваги порівняно з тканинними фільтрами ДУ-100-2,5. По-перше, капілярна дія мікропор усуває проникнення повітря, що знижує навантаження на вакуумні насоси. По-друге, довговічність керамічних пластин (до 5 років порівняно з 3 – 6 місяцями для тканин) зменшує витрати на обслуговування. По-третє, ефективна регенерація за допомогою ультразвуку та азотної кислоти підтримує стабільну продуктивність без додаткових енерговитрат.

Літературні джерела [1, 3] підкреслюють, що енергоефективність керамічної фільтрації залежить від правильного вибору параметрів, таких як густина пульпи, pH суспензії та температура. Наприклад, нейтральний pH (7,0) і температура 36°C сприяють зниженню в'язкості пульпи, що додатково зменшує енергоспоживання. Додавання флокулянтів може підвищити ефективність при низькому вмісті твердих частинок, але їх використання потребує додаткових досліджень для тонких концентратів.

Висновки

1. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 є енергоефективною альтернативою тканинним фільтрам ДУ-100-2,5, забезпечуючи продуктивність 0,7 – 0,9т/м² і залишкову вологу 9,0 – 9,8% при зниженні енергоспоживання на 15–25%.

2. Для дотримання оптимальних параметрів роботи КДФ-90 необхідно контролювати на коригувати такі параметри роботи як: масова частка заліза загального у концентраті, масова частка класу -0,056 мм, питома поверхня концентрату, вакуум у зонах набору та сушки, швидкість обертання дисків, питома продуктивність. Також регулярно необхідно проводити регенерацію фільтрувальних поверхонь за допомогою ультразвуку та азотної кислоти.

3. Розроблена математична залежність прогнозування залишкової вологи має високу точність (середнє відхилення 0,17%; стандартне відхилення 0,202%, величина збіжності 0,9787) і може бути використана для оптимізації процесу зневоднення.

4. Подальші дослідження мають бути спрямовані на аналіз впливу pH суспензії, температури, застосування флокулянтів і коагулянтів, а також на розробку методів зниження витрат при регенерації фільтрувальних пластин.

Література

1. Smith, J. Optimal ceramic filtration operating conditions for an iron-ore concentrate / J. Smith – Minerals Engineering, 2018. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.011
2. Salmimies, R. The scaling and regeneration of the ceramic filter medium used in the dewatering of a magnetite concentrate / R. Salmimies. – International Journal of Mineral Processing, 2013. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.006
3. Adail, M. Influence of process variables on the ceramic capillary filtration of iron ore slurries / M. Adail – Minerals Engineering, 2022. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107562

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE DEHYDRATION PROCESS OF FINELY GROUND IRON ORE CONCENTRATES

Andrii PETELKA
Kryvyi Rih National University
vul. V. Matusevicha, 11, *Kryvyi Rih,* 50027, Ukraine
https://orcid.org/0009-0004-5244-3433

Lyudmila SKLYAR
Kryvyi Rih National University
vul. V. Matusevicha, 11, *Kryvyi Rih,* 50027, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-2721-1436

Abstract

The study focuses on improving the energy efficiency of dewatering finely ground iron ore concentrates to produce raw materials suitable for Direct Reduced Iron (DRI) technology. The aim is to compare the energy efficiency of DU-100-2.5 fabric vacuum filters and KDF-90 ceramic vacuum filters, as well as to determine the optimal operating parameters of the latter to achieve a moisture content in the concentrate within the range of 9.0–9.5% with minimal energy consumption. Experiments conducted at PJSC "CGOK" demonstrated that ceramic filters provide a productivity of 0.7–0.9 t/m² and reduce energy consumption due to the capillary action of micropores and effective regeneration. The scientific novelty lies in the development of a mathematical model for predicting residual moisture with an average accuracy of 0.17% and a convergence value of 0.9787. The practical significance is the potential implementation of an energy-efficient technology at domestic enterprises to enhance competitiveness in the concentrate markets.

Keywords: energy efficiency, dewatering, iron ore concentrate, ceramic vacuum filters, DRI pellets, vacuum filtration.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330317

RECOVERY OF CHROMIUM FROM WASTEWATER INTO PRODUCTION: ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGIES AND APPLICATION PROSPECTS

Serhii POROSHENKO, Oleksandr KHOKHOTVA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: s.poroshenko@kpi.ua

Abstract

This study is dedicated to analysing modern resource-efficient methods for treating industrial wastewater containing chromium compounds, with a focus on technologies that enable the reintegration of recovered chromium into the production cycle. The work examines ion exchange, sorption, electrodialysis, and membrane processes, which remove chromium from effluents and convert it into forms suitable for reuse in industrial operations. The paper outlines future research prospects aimed at improving technologies for the concentration and regeneration of chromium compounds for integration into closed-loop production systems.

Keywords: *wastewater, chromium (VI), water purification, resource conservation, secondary use, environmentally friendly technologies.*

The problem of industrial wastewater contamination with chromium compounds remains highly relevant due to the high toxicity of hexavalent chromium (Cr(VI)) and its ability to accumulate in the environment [1].

Sources of chromium-containing effluents include electroplating workshops (chromium plating), leather production (chrome tanning), pigment manufacturing, and others. Traditional treatment methods for such effluents are aimed at detoxifying Cr(VI) by reducing it to the less toxic trivalent chromium (Cr(III)), followed by chemical precipitation of the insoluble hydroxide $Cr(OH)_3$ [2]. Although these reagent-based methods effectively reduce chromium concentrations in water, they generate large amounts of waste — either toxic sludge or sulfide-alkaline solutions — which cannot be discharged directly into the environment. Therefore, there is a pressing need to implement resource-efficient technologies that minimize waste generation and enable the recovery of extracted chromium as a valuable raw material for reuse in the production cycle.

Chemical Precipitation and Coagulation. Reagent-based precipitation (through the addition of alkalis, sulfides, etc.) is the most widespread method for treating chromium-containing wastewater due to its simplicity and low sensitivity to fluctuations in water composition [2]. Cr(VI) is typically reduced to Cr(III) (e.g., using sulfite, $FeSO_4$, or via catalytic reduction with a TiO_2-palladium catalyst [6]) and then precipitated as $Cr(OH)_3$. The main drawbacks of this method are the high salt content in the treated water and the generation of toxic sludge, which requires further disposal. Electrochemical coagulation using soluble anodes (Fe, Al) enables simultaneous reduction of Cr(VI)

to Cr(III) at the cathode and precipitation of chromium hydroxide along with metal hydroxides from the anodes. However, chromium recovery for reuse in production is challenging with these technologies: the resulting $Cr(OH)_3$ sludge requires additional processing [2].

Sorption Methods. Chromium adsorption on solid sorbents is characterized by versatility and high efficiency, even at low pollutant concentrations. Natural aluminosilicates (such as zeolites, bentonites, and montmorillonites) and modified materials based on them are being studied as sorbents. Nanomaterials with a high specific surface area also show great promise. The adsorbed chromium can be desorbed from the sorbent by acid treatment, and the resulting concentrated chromium solution can be feasibly returned to the production cycle [3].

Ion Exchange. Ion-exchange resins are capable of selectively removing chromate ions $Cr(VI)O_4^{2-}$ from solutions, accumulating chromium in a concentrated regeneration solution. The use of anion-exchange resins is effective for extracting Cr(VI); further treatment of the saturated regeneration solution can yield marketable reagents — chromium compounds suitable for electroplating or leather tanning applications [5].

Membrane Technologies and Electrodialysis. Ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis processes enable the separation of the wastewater stream into purified water and a chromium-enriched concentrate. Reverse osmosis is considered the most promising method at the final stage of treatment [4]. The resulting concentrate, containing significant amounts of Cr(III), can be directly returned to the electroplating process. Additionally, electrodialysis allows the concentration of chromium compounds into forms suitable for technological processes, particularly chromates or dichromates, which can be reused in production [7].

Biological Methods. Microorganisms (such as bacteria and fungi) are capable of reducing Cr(VI) to Cr(III) through metabolic processes and can also accumulate chromium within their cells. The resulting biomass enriched with chromium requires subsequent disposal [8].

The analysis demonstrates that the implementation of closed-loop wastewater treatment systems with chromium recovery for reuse in production is a promising direction in the development of resource-saving technologies. Methods such as electrodialysis, electrochemical resin regeneration, and reverse osmosis not only reduce reagent consumption but also enable the reuse of chromium in industrial processes, aligning with the principles of the circular economy.

However, to achieve maximum efficiency from the implementation of such technologies, further research is needed to improve methods for recovering chromium in forms suitable for technological use. In particular, the development of new materials for ion exchange and sorption holds great promise, as these could not only extract chromium but also convert it into forms applicable in industrial settings. Optimizing regeneration processes for sorbents and ion-exchange resins is also important to minimize the generation of secondary waste. Thus, future research should focus on the integration of technologies that combine purification, concentration, and recycling of chromium into the production cycle.

Reference:

1. Bashir N. F. Chromium (VI) Removal Methods from Effluents – A Review Article // *University of Khartoum Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 11, No 2. – P. 1–6. DOI: 10.53332/kuej.v11i2.700

2. Genawi N.; Ibrahim M.; El-Naas M.; Alshaik A. Chromium Removal from Tannery Wastewater by Electrocoagulation: Optimization and Sludge Characterization // *Water*. – 2020. – Vol. 12, No 5. – P. 1374. DOI: 10.3390/w12051374

3. Ying Z.; Ren X.; Li J. та ін. Recovery of chromium(VI) in wastewater using solvent extraction with amide // *Hydrometallurgy*. – 2020. – Vol. 196. – P. 105406. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105406

4. Engstler R.; Reipert J.; Karimi S. *et al.* A Reverse Osmosis Process to Recover and Recycle Trivalent Chromium from Electroplating Wastewater // *Membranes*. – 2022. – Vol. 12, No 9. – P. 853. DOI: 10.3390/membranes12090853

5. Irshad M. A.; Sattar S.; Nawaz R. *et al.* Enhancing chromium removal and recovery from industrial wastewater using sustainable and efficient nanomaterial: A review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2023. – Vol. 252. – P. 115231. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115231

6. Qin C.; Pan G.; Zhang Y. *et al.* Efficient Reduction of Cr(VI) to Cr(III) over a TiO_2-Supported Palladium Catalyst Using Formic Acid as a Reductant // *Catalysts*. – 2022. – Vol. 12, No 2. – P. 179. DOI: 10.3390/catal12020179

7. Gayathri R.; Kumar P. S. Recovery and reuse of hexavalent chromium from aqueous solutions by a hybrid technique of electrodialysis and ion exchange // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. – 2010. – Vol. 27, No 1. – P. 67–76. DOI: 10.1590/S0104-66322010000100006

8. Wang L.; Zhang Y.; Li H. et al. Bioreduction and Bioaccumulation of Cr(VI) by Indigenous Bacteria from Industrial Wastewater // Environmental Research. – 2024. – Vol. 214. – P. 113274. DOI: 10.1016/j.envres.2024.113274

ПОВЕРНЕННЯ ХРОМУ ЗІ СТІЧНИХ ВОД У ВИРОБНИЦТВО: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Сергій ПОРОШЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0001-8258-8033

Олександр ХОХОТВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-2607-9242

Анотація

Дана робота присвячена аналізу сучасних ресурсозберігаючих методів очищення промислових стічних вод від сполук хрому з акцентом на технологіях, що дозволяють повернути вилучений хром у виробничий цикл. Розглянуто методи іонного обміну, сорбції, електродіалізу та мембранних процесів, що сприяють не лише видаленню хрому зі стоків, але й його перетворенню у форми, придатні для повернення у виробничий цикл. Окреслено перспективи подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення технологій концентрування та регенерації хромових сполук для інтеграції у замкнені цикли виробництва.

Ключові слова: стічні води, хром (VI), очищення води, ресурсозбереження, вторинне використання, екологічно чисті технології.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331622

SUBSTITUTION OF FOSSIL FUELS THROUGH THE GASIFICATION OF CARBON-CONTAINING RAW MATERIALS

Kostiantyn PIANYKH
Gas Institute NAS Ukraine
Dehtiarivska St. 39, Kyiv, 03113, Ukraine
e-mail: pianykhkk@gmail.com

Abstract

The study explores technologies based on the gasification of local fuels to advance renewable energy utilization, supporting global and EU goals to increase renewable energy consumption to 40-45% by 2030. The Department of Alternative Fuels Technology at the Gas Institute of Ukraine is developing two key technologies: electricity generation using generator gas in piston power plants and synthesis gas production for chemical applications. A test-industrial installation demonstrated electrical efficiency of 22-24% when operating on fuels such as wood chips, lignite, and sunflower husk pellets. Emission levels (CO and NOx) met or exceeded EURO-5 standards but slightly underperformed against EURO-6. An industrial system with a capacity of 75 kW is currently under testing. In the second focus area, the team optimized gasification conditions (850-950°C) to produce synthesis gas with a [H_2] : [CO] ratio close to 2:1. Experiments with diverse carbon-containing materials, including rubber from used tires, showed potential for high-calorie gas production and waste utilization. Rubber gasification yielded a gas with a lower heating value of 9804 kJ/m³ and produced a coke residue with 85% carbon content. These findings highlight the versatility of gasification technology for generating electricity and producing feedstock for the chemical industry. The developed solutions demonstrate the feasibility of replacing traditional fuels with sustainable alternatives, contributing to both energy security and environmental protection.

Keywords: *gasification, biofuels, renewable resources, synthesis gas.*

In recent decades, the development of the energy industry around the world has been moving towards renewable energy sources. As an example, we can take the European Union directive on the promotion of energy from renewable sources. This directive. Prescribes an increase in the Consumption of energy from renewable energy sources. Up to 40% by 2030. And also calls for. Collective actions by countries to increase this figure to 45%.

The Department of Alternative Fuels Technology of the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine is developing 2 technologies based on the gasification process of local types of fuel:

- electricity generation;
- production of generator gas, close in properties to synthesis gas, for further use in the chemical industry [1].

The main focus of the Alternative Fuels Technology Department is to generate electricity by using generator gas obtained from local fuels at a piston power plant to create autonomous or mobile sources of electrical energy. Figure 1 shows a photograph and a schematic diagram of this installation. The basis of the installation is a periodic gas generator 1. The generator gas cleaning system includes a heat exchanger-cooler 2, a coarse filter 3 and a fine filter 4, after which the purified generator gas enters a generator based on a piston machine 5.

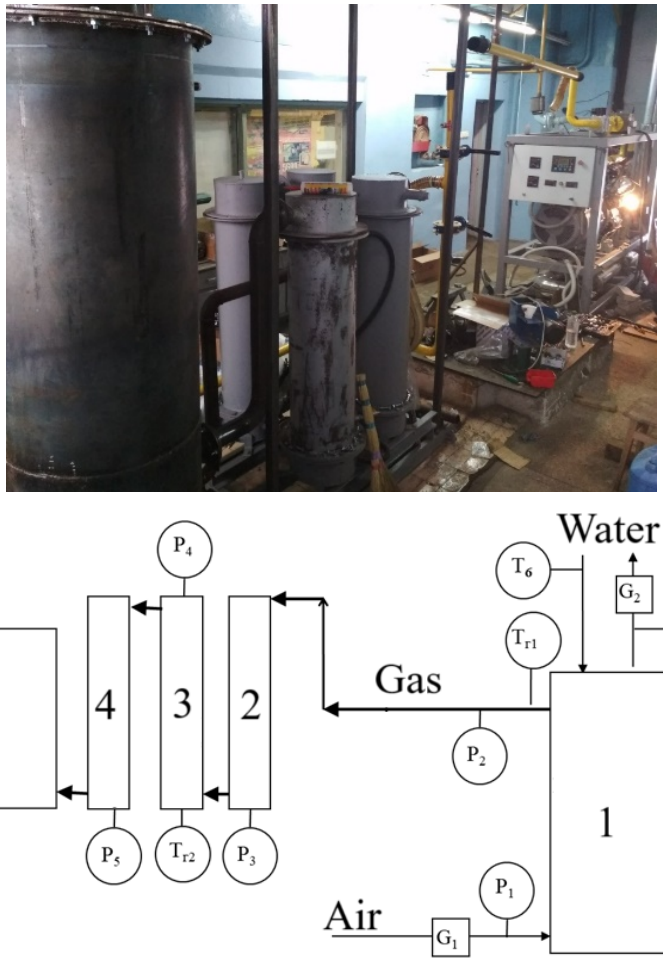


Fig. 1. *Photograph and schematic diagram of a plant for generating electrical energy based on biofuel gasification and using the resulting generator gas i n a piston machine with an electric generator*

Tests conducted on this unit showed the possibility of the unit operating on various types of fuel such as wood chips, sunflower husk pellets, straw, lignite and other. Data obtained during the tests are shown in Fig. 2 and indicate that the electrical efficiency of this unit reaches 22-24% in the optimal mode. The environmental aspect should also be noted: emissions of this unit are CO – 2.58 g/kW*h, and NOx – 0.76 g/kW*h. Which exceeds EURO-5: CO – 4.0 g/kW*h, NOx – 2.0 g/kW*h; but is slightly lower than EURO-6: CO – 4.0 g/kW*h, NOx – 0.4 g/kW*h. Currently, an industrial installation with a capacity of 75 kW for electricity is being tested.

The second area of work of the department is obtaining generator gas with a given ratio of $[H_2]$:[CO].

For the research, design documentation has been developed and a gasification section has been manufactured (Fig. 3) consisting of: gas generator (1), heat exchanger (2), fine gas filter (3). A series of studies was conducted that allowed determining the optimal temperature regimes and fuel/oxygen concentration ratios for regulating the parameters of gaseous gasification products. It was determined that operation in the 850...950°C mode allows obtaining synthesis gas with characteristics [H_2] : [CO] close to 2:1.

The results of gasification of a wide range of carbon-containing resources are presented: lignite, brown coal, rubber from used automobile tires, RDF, wood chips and pellets. Component ratio of acquired gas from conducted experiments presented on Fig. 4.

Results of rubber gasification allowed us to propose this process as a possible one for the utilization of used tires. During the gasification of rubber, high-calorie gas and coke residue are formed, the carbon content of which reaches 85%. Properties of the obtained generator gas when tested on rubber are presented in table 1.

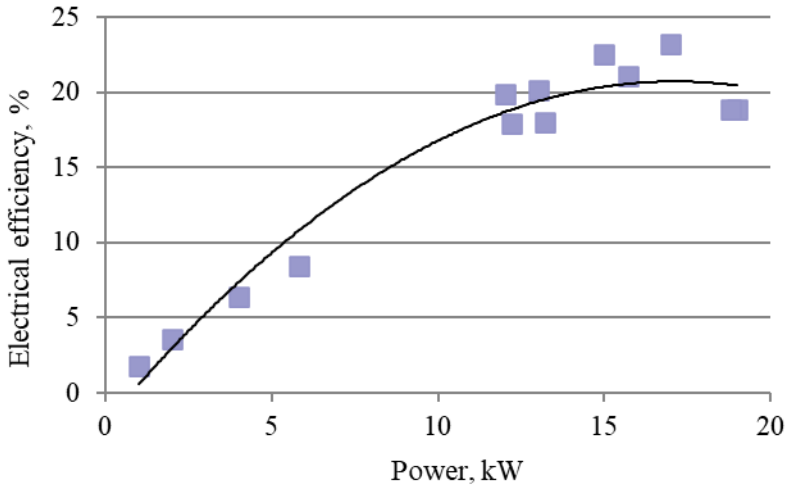
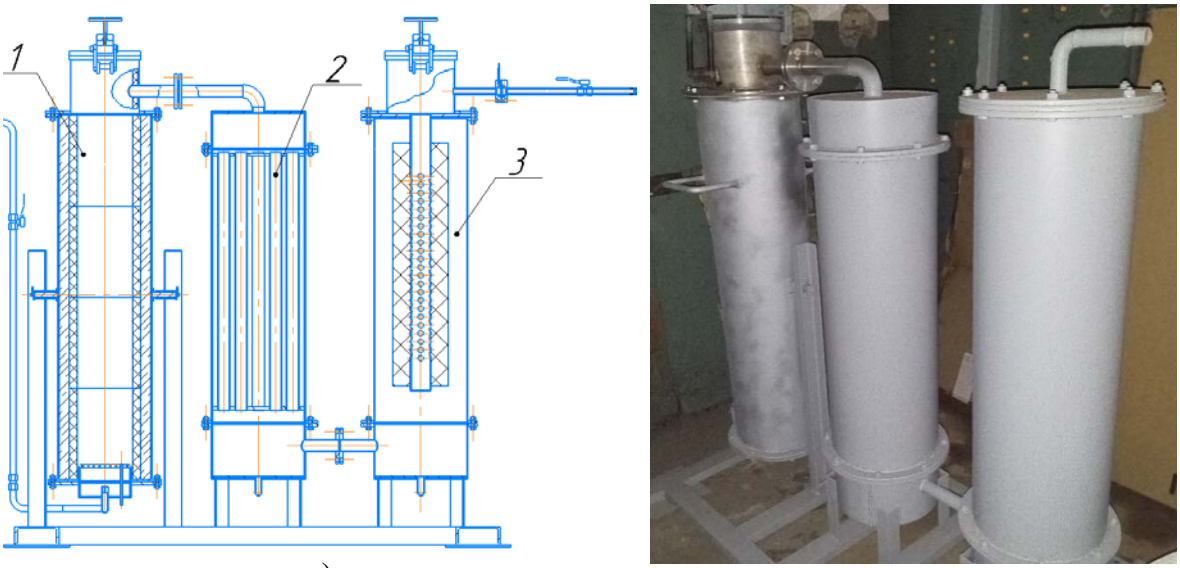


Fig. 2. *Dependence of electrical efficiency on the power of the test-industrial installation*



а) б)

Fig. 3. *Assembly drawing (a) and working section (b) of gasification*

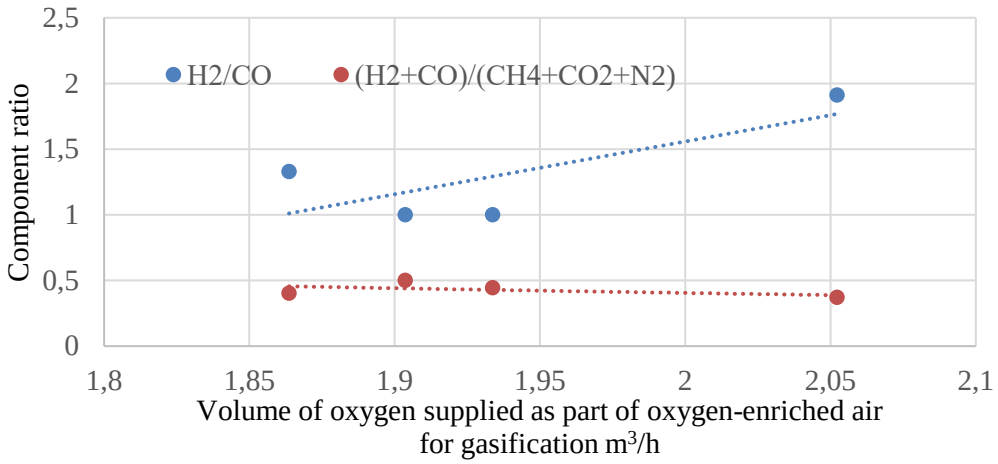


Fig. 4. *Dependence of the ratio of key gas components for the synthesis reaction on the volume of blowing air enriched with oxygen*

Table 1. Title of table in English

Component	**Rubber, %**
H_2	12,59
N_2	56,74
CO	2,49
CH_4	11,65
CO_2	6,00
H_2S	1,22
C_2H_4	4,73
C_2H_2	0,35
C_2H_6	1,25
C_3H_6	0,01
C_3H_8	0,53
iC_4H_{10}	0,42
nC_4H_{10}	0,23
iC_5H_{12}	0,01
neo C_5	0,00
H_2O	1,78
Lower heating value	9804 kJ/m^3

Conclusions

The developed technological solutions involve the use of a periodic gas generator, in which the reverse gasification process is implemented. The results of the research concluded that ehis technology can be used both to obtain electrical energy with indicators close to existing installations on traditional fuel and to obtain generator gas as a raw material for the chemical industry.

References

1. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. *Official Journal of the European Union*, 31 Oct 2023. ELI: http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj (accessed 01.05. 2025).

ЗАМІЩЕННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА ШЛЯХОМ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВОМІСНОЇ СИРОВИНИ

Костянтин П'ЯНИХ
Інститут газу НАН України
вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна
https://orcid.org/0000-0003-1810-6543

Анотація

У дослідженні розглядаються технології, засновані на газифікації місцевих видів палива, для розвитку використання відновлюваної енергії, що підтримує глобальні та європейські цілі щодо збільшення споживання відновлюваної енергії до 40-45% до 2030 року. Відділ технології альтернативних видів палива Газового інституту України розробляє дві ключові технології: виробництво електроенергії з використанням генераторного газу в поршневих електростанціях та виробництво синтез-газу для хімічного застосування. Тестово-промислова установка продемонструвала електричний ККД 22-24% при роботі на такому паливі, як деревна тріска, буре вугілля та гранули з лушпиння соняшнику. Рівні викидів (CO та NOx) відповідали або перевищували стандарти EURO-5, але дещо поступалися EURO-6. Наразі проходить випробування промислова система потужністю 75 кВт. У другій галузі дослідження команда оптимізувала умови газифікації (850-950°C) для отримання синтез-газу зі співвідношенням [H2]:[CO], близьким до 2:1. Експерименти з різноманітними вуглецевмісними матеріалами, включаючи гуму з використаних шин, показали потенціал для виробництва висококалорійного газу та утилізації відходів. Газифікація гуми дала газ з нижчою теплотворною здатністю 9804 кДж/м³ та коксовий залишок з 85% вмістом вуглецю. Ці результати підкреслюють універсальність технології газифікації для виробництва електроенергії та сировини для хімічної промисловості. Розроблені рішення демонструють можливість заміни традиційних видів палива екологічно чистими альтернативами, що сприяє як енергетичній безпеці, так і захисту навколишнього середовища.

Ключові слова: газифікація, біопаливо, відновлювані ресурси, синтез-газ.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330617

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДИХ КОМБІНОВАНИХ ПАЛИВ

Олександр СНІГУР[1], Тетяна ОВЕРЧЕНКО[2], Олена ІВАНЕНКО[2]
[1] *Інституту Газу НАН України*
вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна
[2] *Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського*
Берестейський п-т, 37, м. Київ, 03056, Україна
e-mail: overchenko.tanya@gmail.com

Анотація:
Дослідження засвідчило, що використання методу комплексного (ТГА+ газового) лабораторного аналізу дає змогу оцінити теплотворну здатність нетрадиційних, у тому числі комбінованих палив. Виявлено, що теплота згоряння продуктів газифікації комбінованих палив залежить від їх складу та параметрів технологічного процесу в межах 6–12 МДж/м^3. Це пояснюється тим, що запропонований метод та встановлення має низку особливостей, у тому числі можливість підтримки теплотворної здатності нетрадиційних, зокрема комбінованих палив, на заданому рівні. Досягнення ефекту очікується за рахунок вибору концентрацій компонентів, відповідних заданому значенню Q р.

Ключові слова: *комбіноване 2-компонентне тверде паливо, тверді побутові відходи, системи газифікації, теплотворна здатність синтез-газу.*

За останній час інтерес до енергоефективного використання твердих побутових відходів набирає обертів [1-4], загалом це пов'язано зі зниженням доступності викопного палива, збільшення споживання енергії та негативний вплив на навколишнє середовище. Тверді побутові відходи можна віднести до низькосортного палива для процесів термохімічної конверсії в порівнянні з вугіллям. Відповідно сумісна газифікація стала привабливим варіантом не тільки для покращення результатів газифікації але і для збільшення доступності палива. Дослідження теплової поведінки ТПВ в поєднанні з вугіллям проводилися вченими різних країн світу [5-6], але все ще не достатні для створення технології стандартизованих комбінованих палив на основі ТПВ та вугілля для існуючих систем газифікації.

Наразі тривають дослідження в напрямку сумісної газифікації на базі існуючих газогенераторних установках. Такий підхід розглядається, як перспективний для вдосконалення процесів газифікації, зокрема для оптимізації характеристик синтез-газу. Водночас наявні результати досліджень все ще не достатні для створення технології виробництва стандартизованих комбінованих палив типу вугілля-ТПВ для існуючих систем газифікації [7-8].

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю глибокого вивчення впливу технологічних параметрів процесу газифікації комбінованих палив на теплотворну здатність одержаного синтез-газу.

Метою роботи є експериментальне визначення чисельних показників складу та теплотворної здатності продуктів газифікації комбінованих палив залежно від співвідношення вхідних компонентів, а також підтвердження гіпотези щодо механізму газифікації.

Об'єктом дослідження є комбіноване 2- компонентне тверде паливо «вугілля ТПВ» (ТПВ – тверді побутові відходи) у 5 навісках з концентраціями 0- 100 (мас %) кожного компоненту. Одним з проблемних місць є удосконалення процесів газифікації ТПВ, зокрема оптимізація характеристик синтез-газу.

Таблиця 1. Склад комбінованого палива на основі збагаченого вугілля шахти «Білоріченська» (селище міського типу Білоріченський, Луганська обл., Україна)

№ навіски	Компоненти, г		Робоча маса, мас.%							$Q_н^р$, МДж/кг
	Маса вугілля	Маса ТПВ	*C*	*H*	*N*	*S*	*O*	*A*	*W*	
1	16	0	66,0	4,4	1,4	3,8	5,0	14,7	4,7	26,7
2	12	4	61,5	5,0	1,2	3,6	10,1	13,9	4,8	25,3
3	8	8	57,0	5,5	0,9	3,4	15,2	13,1	4,9	23,9
4	4	12	52,5	6,1	0,6	3,2	20,3	12,3	4,9	22,5
5	0	16	48,0	6,7	0,3	3,0	25,4	11,5	5,0	21,1

В ході дослідження використовувалися лабораторна термогравітаційна установка, яка являє собою фізичну модель реактору проточного типу з рециркуляцією проміжних продуктів реакції. До складу цієї установки входять блок установки ТГА (термогравіметричного аналізу), хроматограф, комп'ютер з принтером, система автоматичної оброки даних за допомогою комп'ютерних методів, а саме: термогравіметричного та хроматографічного аналізу.

Схема установки, вузлів та елементів

Основний блок установки (реактор-піч) виконаний як реактор проточного типу з зовнішнім обігріванням та/або компенсацією втрат теплоти. На вхід реактору знизу підведена лінія подачі повітря від компресору 4 або від ємності 6. Вихід реактора з верхньої частини з'єднаний з холодильником 3 і далі – з еластичною ємністю 5. В реакторі встановлені термопари у вказаних точках виміру – для вимірювання температур над кошиком (10), у зоні нагрівання (11) та під кошиком (12). Кошик підвішений на датчику 7, сигнал від якого заведений у систему АЦП. Склад газу аналізувався на стаціонарному хроматографі ХЛ-6.

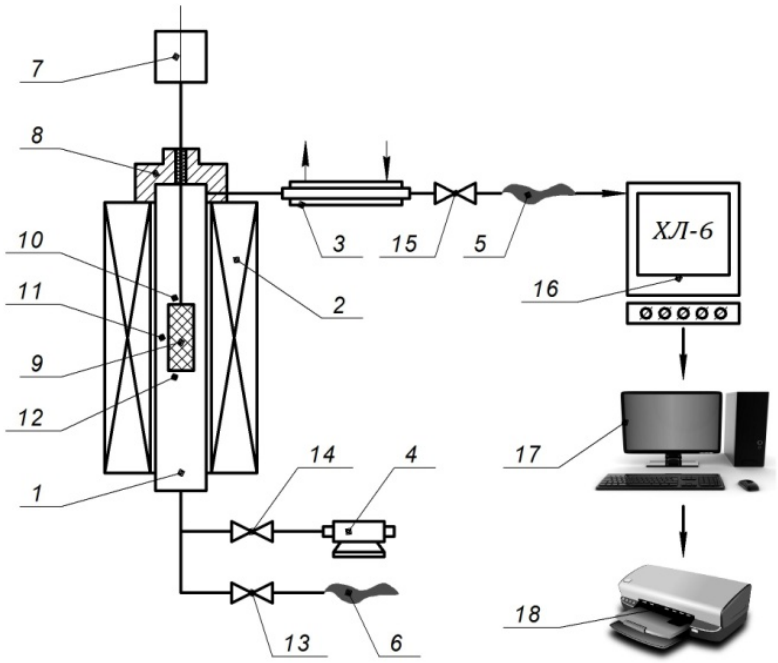


Рис.1.*Схема модифікованої лабораторної установки. 1 – реактор; 2 – піч; 3 – холодильник; 4 – компресор; 5, 6 – еластична ємність; 7 – датчик маси; 8 – кришка; 9 – кошик з навіскою; 10-12 – точки виміру температури; 13-15 – вентиль; 16 – хроматограф, 17 – комп'ютер, 18 – принтер*

Наведені графіки показують яким чином відбуваються зміни складу газової фази згідно з ступенями її рециркуляції в реакторі проточного типу.

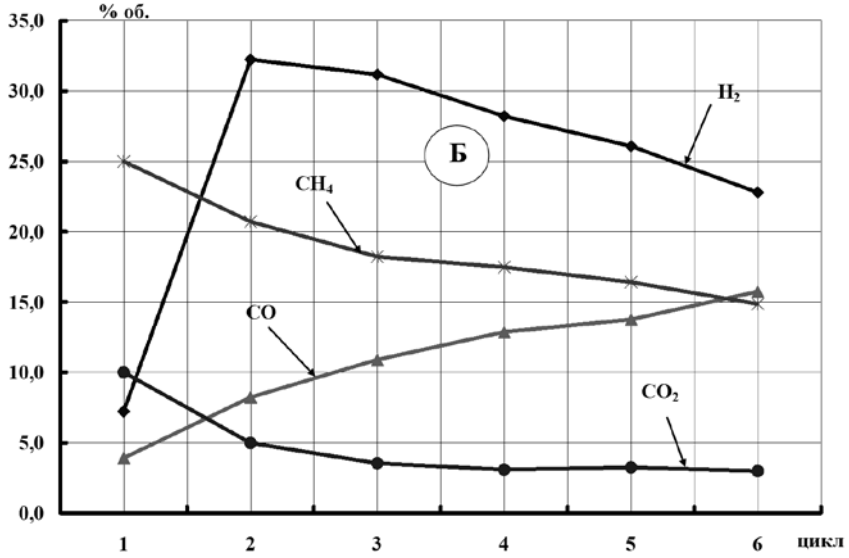


Рис. 2. *Склад газової суміші у досліді 1*

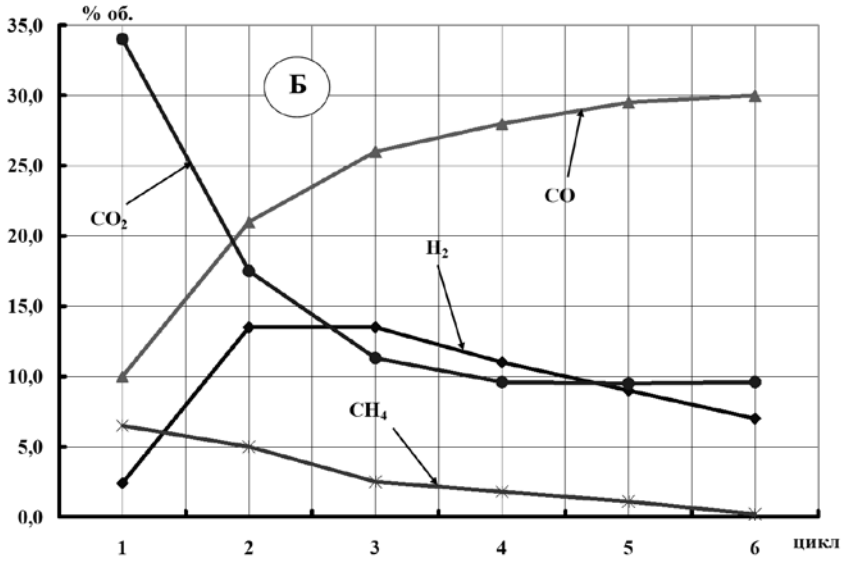


Рис. 3. *Склад газової суміші у досліді №5*

Відомо, що леткі речовини не містяться в паливі як індивідуальні речовини, а мають властивість утворюватися при нагріванні палива (саме тому кажуть не про «вміст» летких, а про їх «вихід»). До складу летких входять CO_2, H_2O (пара), CO, H_2, CH_4 та інші більш складні газоподібні вуглеводні.

Характер кривих маси та температур як функцій часу є однаковим для всіх навісок різного складу, подібно до графіку, наведеному як приклад на рис. 4. Різниця полягає у чисельних показниках.

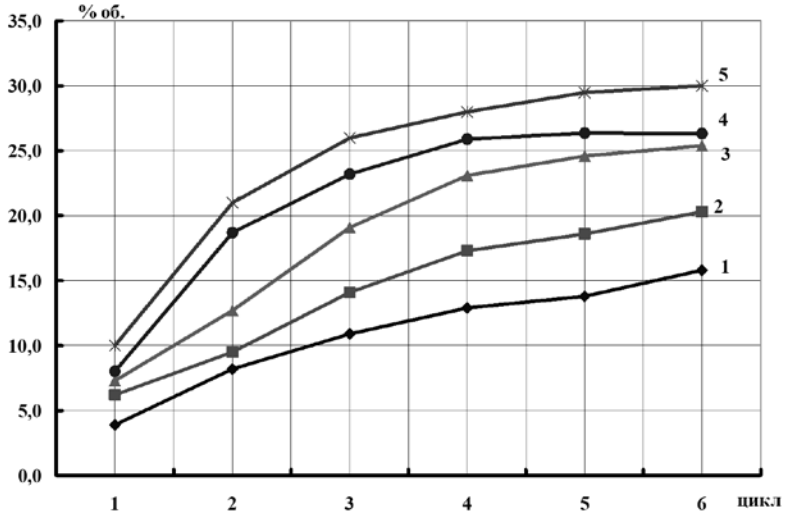


Рис.4. *Залежність концентрації CO від складу комбінованого палива*

Зміна маси в залежності від складу навіски відбувається у діапазоні температур від (200-300)ºС до ~ 800 ºС; саме у ньому відбувається вихід летких речовин. Результати показані в таблиці 2.

Таблиця 2. Втрата маси навіски у дослідах

№ досліду	1	2	3	4	5
ΔМ, г	5,7	8,9	10,4	11,3	12,0

Характер зміни ΔМ відповідає даним по виходу летких речовин:

- вугілля шахти «Белореченская» – 30,8 (на суху масу);
- ТПВ – від 80–90 (папір, текстиль, пластмаси) до 50–65 (шкіра, гума, харчові відходи, та ін.).

Характер кривих маси та температур як функцій часу є однаковим для всіх навісок різного складу (рис. 5). Розгляд термограми показує, що процес газифікації практично повністю закінчується у 2-му циклі, що підтверджується максимальною втратою маси *G* (г).

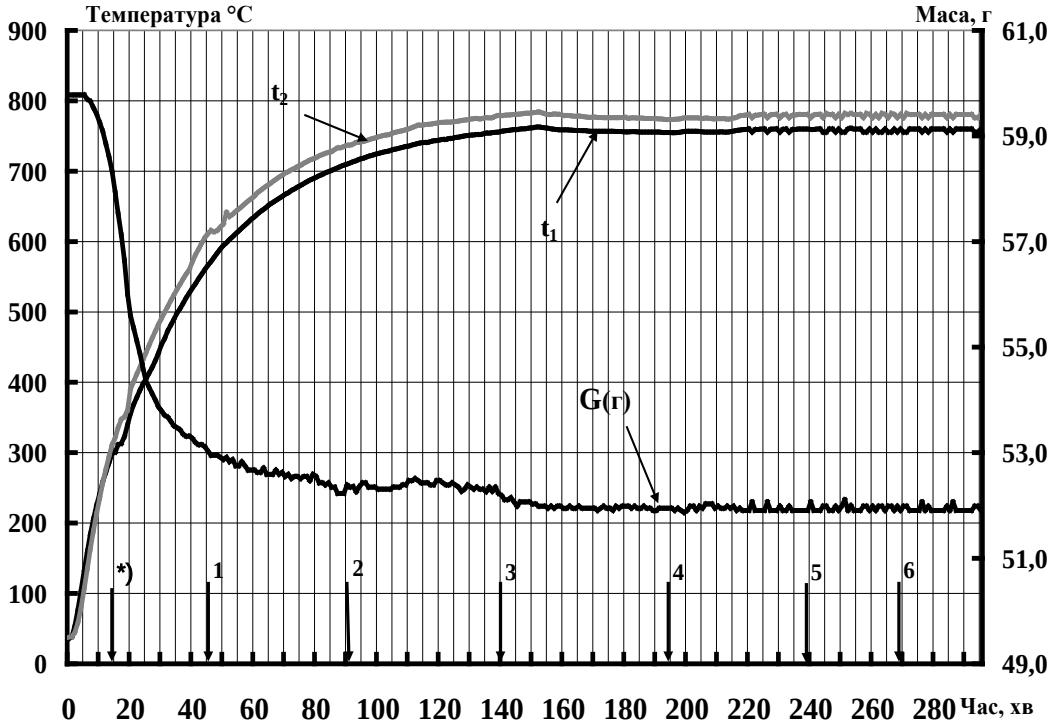


Рис.5. *Динаміка зміни маси навіски та температурних показників у реакторі впродовж одиничного досліду (навіска: вугілля – 8 г, ТПВ – 8 г)*

Зольність, визначена шляхом спалювання коксо-зольного залишку та вимірювання початкової та остаточної маси, складала у різних дослідах 14,5 – 18,0%, відповідний вміст коксу: 85,5 – 82%. Якщо припустити, що кокс складається з 100%-ного вуглецю, відповідна теплотворна здатність твердого залишку $Q_н^р$ = (29,0 – 27,8) МДж/кг у порівнянні з первинним паливом: (26,7 – 21,1) МДж/кг (табл.1). Якщо враховувати навіть незначний вміст водню у вигляді важких вуглеводнів (у даному дослідженні не аналізувався), реальна величина $Q_н^р$ є значно більшою. Цей факт необхідно враховувати при розробці технології автотермічного процесу.

Процес утворення генераторного газу також має однаковий характер для всіх варіантів комбінованого палива, відрізняючись чисельними значеннями концентрацій окремих компонентів. В усіх дослідах спостерігалось різке зростання концентрації H_2 у другому циклі

(що відповідає досягненню температури (750 - 800)ºС), яка досягає максимуму, після чого повільно знижується. Концентрація *CO* плавно збільшується та у дослідах з навіскою 75% та 100% ТПВ перевищує криву H_2. Концентрація CO_2 у всіх дослідах максимальна у першому циклі, далі знижується, що пояснюється початковим окисленням горючих компонентів та подальшими витратами на конверсію вуглеводнів та окислення твердого вуглецю. Відповідно зменшується також концентрація CH_4, досягаючи мінімуму в кінці експерименту.

У ході дослідження встановлено, що за допомогою комплексного (ТГА + газового) лабораторного аналізу можливо оцінювати теплотворну здатність нетрадиційних, зокрема комбінованих, палив.

Запропонована у роботі методика забезпечує можливість експрес-оцінки різних партій ТПВ та визначати оптимальне співвідношення компонентів у системі «вугілля-ТПВ».

Література

1. Klinghoffer, N. B., Castaldi, M. J. (2013). *Waste to Energy Conversion Technology*. Elsevier, 256. doi: http://doi.org/10.1533/9780857096364
2. Young, G. C. (2010). *Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons*. John Wiley & Sons, 396. doi: http://doi.org/10.1002/9780470608616
3. Rogoff, M. J., Screve, F. (2011). *Waste-to-Energy: Technologies and Project Implementation*. Elsevier, 184.
4. Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K. (2013). *Waste Management*. Springer Science & Business Median, 699.
5. Shmarin, S. L., Luchko, I. A. (2011). Pomesiachnoe izmenenie morfologicheskogo sostava, kaloriinosti, vlazhnosti i zolnosti tverdykh bytovykh otkhodov. *Visnik Nacionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiivskii politekhnichnii institut". Seriia: Girnictvo, 21,* 136–143.
6. Pliaskina, N. I. (2012). Ocenka energeticheskogo potenciala utilizacii tverdykh bytovykh otkhodov (na primere Novosibirskoi oblasti). *Gorenie tverdogo topliva.* Available at: http://www.itp.nsc.ru/conferences/gtt8/files/79Plyaskina.pdf
7. Farzad, S., Mandegari, M. A., Görgens, J. F. (2016). A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments. *Biofuel Research Journal, 3 (4),* 483–495. doi: http://doi.org/10.18331/brj2016.3.4.3
8. Tanigaki, N., Ishida, Y., Osada, M. (2012). A case-study of landfill minimization and material recovery via waste co-gasification in a new waste management scheme. *Elsevier Waste Management, 32 (4),* 667–675.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS OF GASIFICATION OF SOLID COMBINED FUELS

Oleksandr SNIGUR
Of the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
st. Degtyarivska, 39, Kyiv, 03113, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-7100-850X

Tetyana OVERCHENKO
Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute
Peremohy Ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-5883-6228

Olena IVANENKO
Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute
Peremohy Ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6838-5400

Abstract: The study showed that the use of the method of complex (THA + gas) laboratory analysis makes it possible to assess the calorific value of unconventional fuels, including combined fuels. It was found that the heat of combustion of gasification products of combined fuels depends on their composition and technological process parameters within the range of 6–12 MJ/m^3. This is explained by the fact that the proposed method and installation has a number of features, including the ability to maintain the calorific value of unconventional, in particular combined fuels, at a given level. The effect is expected to be achieved by selecting the concentrations of components corresponding to the given value of Q r.

Keywords: combined 2-component solid fuel, solid household waste, gasification systems, calorific value of synthesis gas.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332358

MATHEMATICAL MODELLING TASKS FOR HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT ESTIMATION USING NEURAL NETWORKS

Dmytro STEFANYSHYN, Yaroslav KHODNEVYCH[1], Oleksandr TROFYMCHUK[1], Vasyl KORBUTIAK[2], Daniel BENATOV [3]

[1] *Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine*
13 Chokolivskyi Boulevard, Kyiv, 03186, Ukraine
[2] *National University of Water and Environmental Engineering*
11 Soborna Street, Rivne, 33028, Ukraine
[3] *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
37 Beresteiskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua

Abstract

This paper presents a comprehensive approach to estimating the Chézy roughness coefficient as a key parameter of hydraulic resistance in natural river channels. Based on the analysis of 43 well-known empirical and semi-empirical formulae for C, as well as 13 formulae for the Gauckler–Manning coefficient, the dependencies were systematised and classified into groups according to hydromorphological and hydraulic parameters.

An artificial neural network (ANN) was developed to estimate the coefficient C considering key hydromorphological factors. The model was validated using data from the Dnipro, Desna, and Prypiat rivers; the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) values ranged from 0.94 to 0.98, with relative errors of 0.9–13.9%.

Additional testing was conducted on mountain rivers (Tysa, Teresva, Latorytsia, Opir, Rika, Chornyi Cheremosh), where anomalous values were excluded from the training datasets, improving prediction accuracy. It was demonstrated that the use of one- or two-layer ANNs is appropriate when high-quality training data are available.

To improve accuracy under limited data conditions, an ensemble model (ANN-A, ANN-B1, ANN-B2) was implemented using the bagging method. A strategy of independent training of networks was applied, followed by aggregation of outputs using majority voting. The testing results showed relative discharge errors ranging from 0.3% to 6.1%, and NSE values from 0.991 to 0.998.

The study confirms the high accuracy and practical applicability of the ensemble approach for estimating the Chézy coefficient in contexts with limited hydromorphological information.

Keywords: *Chézy coefficient, hydraulic resistance, artificial neural networks, model ensemble, mathematical modelling, river flows, hydromorphology, NSE, machine learning, hydraulic engineering structures.*

Hydraulic resistance refers to the forces with which the riverbed or channel bed opposes the motion of the water flow. The main factors influencing the magnitude of these forces include: roughness elements, bedforms and other obstacles, channel bends and curvature, variability in cross-sectional shape and size along the channel, suspended and bedload sediments, vegetation, ice phenomena, and others.

Typically, hydraulic resistance is evaluated using integral parameters such as roughness coefficients, Chézy coefficients, hydraulic friction coefficients, or roughness element height. The calculation of mean flow velocities in open channels, while accounting for hydraulic resistance, is one of the central problems in river hydraulics.

The aim of the study is to develop and experimentally validate an ensemble-based computational model using artificial neural networks (ANNs) for estimating the Chézy coefficient under various hydromorphological river conditions, in order to improve the reliability of hydraulic calculations and the robustness of engineering decision-making.

The mathematical modelling of the Chézy roughness coefficient for river flow conditions is considered using neural networks, encompassing a set of the following tasks.

1. A study of existing methods for estimating the Chézy roughness coefficient as a measure of hydraulic resistance in river channels [1]

As part of this study, we reviewed, analysed, and systematised a wide range of well-known and frequently cited empirical and semi-empirical formulae and relationships used to estimate the Chézy roughness coefficient. In total, 43 such formulae were examined, along with 13 additional formulae applicable to the estimation of the Gauckler–Manning roughness coefficient.

Based on these expressions, approximately 250 empirical equations can be constructed for determining the Chézy coefficient as a function of river and channel hydromorphological characteristics, hydraulic conditions, applicable ranges, and other factors.

The study resulted in the development of a general classification and systematisation of the main empirical and semi-empirical relationships, grouped as follows:

1. formulae primarily expressing the relationship between the Chézy coefficient C and the Manning roughness coefficient n, sometimes also incorporating the hydraulic radius or the average flow depth;
2. formulae in which hydraulic resistance is determined based on the height of channel roughness elements or the mean diameter of bed and bank material particles, or the height and length of bedforms;
3. formulae that account for the effect of water surface slope and average flow depth or hydraulic radius;
4. formulae expressing the dependence of the C coefficient on the average channel width and hydraulic radius (or mean flow depth).

Overall, it can be concluded that there is no ideal or universally applicable method for determining the Chézy roughness coefficient. Key challenges include uncertainties related to hydromorphological changes associated with sediment deposition and erosion processes in natural watercourses, as well as seasonal variations in aquatic and riparian vegetation, including floodplain dynamics.

Moreover, hydraulic resistance may vary due to the spatio-temporal variability of other hydraulic parameters. A critical factor in the reliable estimation of the Chézy coefficient using various empirical methods lies in the accuracy of field measurements of the input parameters used in the selected formulae, as these strongly influence the relative error of the final calculations.

2. Study and development of a data structure for training an artificial neural network in solving problems related to the calculation of the Chézy roughness coefficient [2]

As part of this task, the problem of structuring the data and developing general rules for the formation of training and testing datasets was addressed. These datasets are intended for training artificial neural networks (ANNs) developed to estimate the Chézy roughness coefficient, taking into account the parametric uncertainty of input data related to hydromorphological factors and parameters characterising hydraulic resistance in river channels.

The modelling was performed using a fully connected feedforward artificial neural network with a single hidden layer. The network architecture consisted of two input neurons, four neurons in the hidden layer, and one output neuron. A standard sigmoid transfer function was applied in the hidden layer neurons, while a linear activation function was used in the output neuron. Python was employed for network design, training, and testing.

It was proposed that both training and evaluation of the ANN for Chézy coefficient prediction should incorporate the following key hydromorphological parameters: the Gauckler–Manning roughness coefficient *n* and water surface slope S_f; average flow width *B* and depth *h*; height of bed roughness elements Δ and hydraulic radius *R*. It is assumed that multicollinearity among these parameters is either absent or negligible.

Considering the interdependencies between the Chézy coefficient (*C*) and the identified parameters, representative input parameters $(x_1,\ x_2)$and corresponding training datasets $(x_1,\ x_2, C)$ were prepared. Using these, the ANN computes the Chézy coefficient (*C*) as the dependent variable (1), where selected combinations of input parameters $x_1,\ x_2$ are treated as independent variables.

$$C = f(x_1,\ x_2),\ x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\}. \qquad (1)$$

The separation of parameters into two characteristic groups was carried out based on the analysis of various empirical formulae and relationships that can be used to determine the Chézy coefficient, drawing on the findings of the previous study [1].

Accordingly, the proposed computational model (1), based on a feedforward ANN with a sigmoidal logistic activation function, performs the approximation of continuous functions. The ANN is trained using the backpropagation algorithm.

The structuring of the network input data $(x_1,\ x_2)$ and training samples $(x_1,\ x_2, C)$ involved the construction of informative, smoothed, continuous, and normalised input data arrays, taking into account statistical uncertainty (e.g., errors, missing measurements, etc.).

Training and testing of the ANN were carried out using current hydromorphological data from selected lowland sections of the Dnipro, Desna, and Prypiat Rivers.

The adequacy of the proposed computational model for predicting the Chézy coefficient was demonstrated using the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient, which is commonly applied in hydrological and hydraulic modelling and forecasting.

3. Study of the Effectiveness of Chézy Roughness Coefficient Estimation Using an Artificial Neural Network for Supporting Mathematical Modelling of River Flows [3]

The task of calculating the Chézy coefficient was addressed using the neural network proposed in the previous study [2], based on a limited set of field data on the hydrological and hydromorphological characteristics of selected sections of lowland rivers — the Dnipro, Desna, and Prypiat — as well as mountain rivers including the Tysa, Teresva, Latorytsia, Opir, Rika, and Chornyi Cheremosh.

It was proposed that, during the stage of domain analysis and field data collection for ANN training dataset construction, anomalous and incomplete data samples related to river reach characteristics should be excluded from consideration.

The procedure for evaluating the ANN's effectiveness was based on comparing observed Q_o and predicted Q_p water discharges (Q_p were determined using the Chézy coefficient C_p, estimated via the neural network).

Predicted values obtained using training samples containing anomalous data were associated with relative errors ranging from 3.8% to 18.1%.

The ANN trained on samples without anomalous data produced more accurate predictions, with relative errors ranging from 0.9% to 13.9%.

4. Study of the Optimal Architecture of a Multilayer Artificial Neural Network for Estimating the Chézy Roughness Coefficient [4]

In this task, the prediction of the Chézy roughness coefficient was performed in accordance with computational model (1), based on the neural network previously validated in studies [2, 3]. The investigation focused on fully connected feedforward artificial neural networks (ANNs) with one, two, and three hidden layers.

The training and testing of the different ANN configurations were carried out using datasets on the hydrological and hydromorphological characteristics of selected sections of both lowland and mountain rivers, developed within the framework of studies [2, 3].

Testing various ANN architectures produced the following key results. For calculating the Chézy coefficient within the proposed computational model, it is sufficient to use a feedforward ANN with one or two hidden layers and a sigmoidal logistic activation function, provided that a high-quality training dataset is available.

In the test cases based on data from [2, 3], the relative error in discharge predictions ranged from 0.9% to 13.9%, depending on the river. The Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient for model performance ranged from 0.94 to 0.98, indicating a level of accuracy sufficient for practical applications of Chézy coefficient estimation.

5. Ensemble Modelling of the Chézy Hydraulic Resistance Coefficient Using Artificial Neural Networks [5]

The task of estimating an approximate value of the Chézy hydraulic resistance coefficient $\widetilde{C}$ is considered using an ensemble of artificial neural networks (ANNs):

$$\tilde{\mathrm{C}}(x_1, x_2) = \mathrm{C}_A \pm \phi,\ x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\}, \qquad (2)$$

where $\mathrm{C}_A = f(x_1, x_2)$ – the value of the Chézy coefficient in the first approximation, calculated using the baseline ANN (ANN-A), which was validated in our previous studies [2–4]; $\phi = f(x_1, x_2)$ – a refinement term determined using two additional ANNs (ANN-B1 and ANN-B2), developed based on the baseline network model.

To solve problem (2), established methods from ensemble modelling theory are proposed. The ensemble approach is based on the idea of combining several base machine learning models into a unified structure to create a more robust composite model, which can outperform its individual components and significantly improve prediction accuracy.

In the context of problem (2), a homogeneous ensemble of neural network models—ANN-A, ANN-B1, and ANN-B2—was employed, along with a strategy of using independent datasets for each

ANN. The ensemble training and the creation of data subsets for the individual network models were carried out using the bagging (Bootstrap Aggregating) method. Accordingly, a parallel ensemble training technique was applied for the individual ANNs using the backpropagation algorithm.

The aggregation of output data (predictions) from the ensemble components into a single forecasted result, in accordance with computational model (2), was based on the majority voting method, with consideration of inverse problem solutions.

Python was used for the development, training, and testing of the neural network ensemble. The software implementation of the computational algorithms for training the ANN ensemble and predicting the Chézy roughness coefficient is presented in [6].

For the validation of the computational algorithm for hydraulic resistance coefficient prediction using the ANN ensemble, datasets on hydrological and hydromorphological characteristics of selected lowland and mountain river sections, as proposed in studies [2, 3], were utilised. The testing procedure consisted in comparing observed values Q_o and calculated (predicted) values Q_p based on the computed (predicted) values of the Chézy coefficient C_p, obtained using the artificial neural network ensemble.

It was shown that the relative errors of the predicted values Q ranged from 0.3% to 6.1%, depending on the river, and the values of the Nash–Sutcliffe Efficiency coefficient *NSE* were in the range of 0.991 to 0.998.

The validation results indicate that the computational accuracy is sufficient for practical applications and confirm the high predictive capability of the proposed ANN ensemble-based algorithm for estimating the Chézy coefficient.

Conclusions

The accuracy of hydraulic resistance parameter estimation is critically important for solving engineering problems related to the design of hydraulic structures and water resources management, regardless of the selected mathematical models or computational approaches.

Given the considerable variability of hydromorphological conditions in river systems, flow resistance varies over a wide range, directly affecting discharge capacity. In this context, the Chézy roughness coefficient C proves to be a more representative parameter of hydraulic resistance compared to other empirical characteristics, such as the Gauckler–Manning and Darcy–Weisbach coefficients. Its advantage lies in the ability to reflect the combined influence of morphological and hydrological factors.

However, no universal method for determining the Chézy coefficient C exists, and the accuracy of its estimation largely depends on the reliability (precision) of field measurements of relevant hydromorphological parameters in open-channel flows.

The results of Chézy coefficient modelling based on artificial neural networks have shown that, under conditions of limited input data, the application of ensemble approaches can reduce errors and improve the reliability of predictive estimates, helping to overcome the limitations inherent in individual models.

References

1. Stefanyshyn, D. V., Khodnevich, Y. V., Korbutiak, V. M. (2021). Estimating the Chezy roughness coefficient as a characteristic of hydraulic resistance to flow in river channels: a general overview, existing challenges, and ways of their overcoming. Екологічна безпека та природокористування, 39(3), 16–43. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43.

2. Yaroslav V. Khodnevych, Dmytro V. Stefanyshyn (2022). Data arrangements to train an artificial neural network within solving the tasks for calculating the Chezy roughness coefficient

under uncertainty of parameters determining the hydraulic resistance to flow in river channels. Екологічна безпека та природокористування, Том 42 № 2, 59-85. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.59-85

3. Khodnevych, Y., Stefanyshyn, D., Korbutiak, V. (2023). The Chezy Roughness Coefficient Computing Using an Artificial Neural Network to Support the Mathematical Modelling of River Flows. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_26

4. Yaroslav Khodnevych, Dmytro Stefanyshyn (2023). Do we need a more sophisticated multilayer artificial neural network to compute roughness coefficient? Екологічна безпека та природокористування, 48(4), 170–182. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.170-182

5. Ходневич Я.В., Стефанишин Д.В. (2024). До питання обчислення коефіцієнта гідравлічного опору за допомогою ансамблю штучних нейронних мереж. Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами 23 Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) За заг. ред. С.О. Довгого. Київ, ТОВ «Видавництво «Юстон», 121-123. https://itgip.org/wp-content/uploads/2024/11/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210.pdf

6. Khodnevych, Ya. (2025). Software Implementation of a Computational Algorithm for Training an Ensemble of Neural Networks to Predict the Chezy Roughness Coefficient. Available from https://github.com/yakhodnevych/ANNE_approximation_C.git

ЗАДАЧІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Дмитро СТЕФАНИШИН
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, 03186
https://orcid.org/0000-0002-7620-1613

Ярослав ХОДНЕВИЧ
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, 03186
https://orcid.org/0000-0002-5510-1154

Олександр ТРОФИМЧУК
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, 03186
https://orcid.org/0000-0003-3358-6274

Василь КОРБУТЯК
Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000
https://orcid.org/0000-0002-8273-2306

Даніель БЕНАТОВ
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056
https://orcid.org/0000-0001-9626-6759

Анотація

У роботі представлено комплексний підхід до оцінки коефіцієнта шорсткості Шезі як ключової характеристики гідравлічного опору в природних річкових руслах. На основі аналізу 43 відомих емпіричних і напівемпіричних формул для *C*, а також 13 формул для коефіцієнта Гоклера–Меннінга, було здійснено систематизацію залежностей та класифікацію їх за групами залежно від гідроморфологічних та гідравлічних параметрів.Розроблено штучну нейронну мережу (ШНМ) для оцінки коефіцієнта *C* з урахуванням основних гідроморфологічних параметрів. Модель апробовано на даних для річок Дніпро, Десна та Прип'ять; коефіцієнт ефективності Неша–Сатклiффа (NSE) становив 0,94–0,98, а відносна похибка 0,9–13,9%.Додаткове тестування здійснено для гірських річок (Тиса, Тересва, Латориця, Опір, Ріка, Чорний Черемош) із виключенням аномальних значень з навчальних вибірок, що покращило точність прогнозів. Показано, що використання одно- або двошарових ШНМ є доцільним при якісному навчальному наборі.

Для підвищення точності в умовах обмеженого обсягу даних реалізовано ансамблеву модель (ANN-A, ANN-B1, ANN-B2) з методом беггінгу. Застосовано стратегію незалежного навчання мереж із подальшим об'єднанням результатів за принципом максимального голосування. За результатами тестування отримано відносні похибки витрати води в межах 0,3–6,1% та значення *NSE* від 0,991 до 0,998.

Результати дослідження підтверджують високу точність і практичну придатність ансамблевого підходу для оцінки коефіцієнта Шезі в умовах обмеженої гідроморфологічної інформації.

Ключові слова: коефіцієнт Шезі, гідравлічний опір, штучні нейронні мережі, ансамбль моделей, математичне моделювання, річкові течії, гідроморфологія, NSE, машинне навчання, гідротехнічні споруди.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331455

ОКСИДНОМЕТАЛЕВИЙ ЕЛЕКТРОД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СПОЛУК ГІДРАЗИНУ

Альона ТАРАСОВА, Андрій КУШМИРУК, Олексій КОСОГІН
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: tarasova.alona@lll.kpi.ua

Анотація

Робота присвячена встановленню можливості використання оксидно-металевих електродів як складових електрохімічних систем – газових сенсорів, які використовуються для визначення концентрації небезпечних речовин в газовому промисловому та техногенному середовищах. Показано можливість використання як чутливого електрода амперметричного сенсора титанового електрода, активованого шаром діоксиду рутенію. Запропоновано електрохімічну систему, придатну для визначення гідразину в повітряному середовищі.

Ключові слова: *гідразин; діоксид рутенію; хлорид літію; окиснення; газовий сенсор*.

Важливою умовою для забезпечення якісного та здорового життя є доступ до чистого довкілля, що також визнано Генеральною Асамблеєю ООН як базове право людини [1]. Однак внаслідок антропогенного впливу навколишнє середовище зазнає негативних змін, які прямо чи опосередковано впливають на людську життєдіяльність. Такі умови спонукають людство до усвідомлення проблеми та пошуку можливих рішень для мінімізації викидів у довкілля, зокрема проведення досліджень та розробки пристроїв моніторингу водних та повітряних середовищ.

Одними з актуальних забруднювачів навколишнього середовища є гідразин та його похідні, які належать до високотоксичних та канцерогенних речовин. Їх присутність становить серйозну загрозу як для екологічної безпеки, так і для здоров'я населення. Гідразин широко застосовується в низці промислових галузей, зокрема в авіаційно-космічній, оборонній, а також у ядерній і тепловій енергетиці як ефективний реагент для усунення кисню з теплоносія [2]. В Україні найбільше використання гідразин-гідрату припадає на атомні електростанції, де він використовується для підтримання стабільного водно-хімічного режиму в ядерних реакторах. Завдяки своїй відновній дії гідразин сприяє зниженню інтенсивності корозійних процесів у трубопроводах та теплообмінному обладнанні, що є критично важливим для надійної та тривалої експлуатації енергоблоків. Наприклад, на Рівненській і Південноукраїнській АЕС гідразин-гідрат регулярно закуповується із цією метою [3].

Однак під час промислового використання гідразину можливе його потрапляння в довкілля, зокрема у повітря, водні середовища та ґрунти. Хоча у воді гідразин досить швидко окиснюється, навіть короткочасна присутність гідразину може чинити токсичний вплив на мікроорганізми, порушуючи біоценоз водних екосистем [4]. З огляду на екологічні ризики, що

супроводжують використання гідразину, актуальним завданням є розробка чутливих, точних і доступних засобів контролю його вмісту, особливо в умовах воєнного часу, коли ризики несанкціонованих викидів або аварійних ситуацій суттєво зростають.

Серед перспективних інструментів контролю концентрацій гідразину вирізняються електрохімічні сенсори, що поєднують високу чутливість, швидкодію, низьку вартість та простоту конструкції. Принцип дії таких сенсорів ґрунтується на залежності електрохімічних характеристик (струму, потенціалу, кількості електрики, електропровідності) від концентрації аналіту. Залежно від параметра, що реєструється, електрохімічні методи поділяються на вольтамперометричні, потенціометричні, кулонометричні та кондуктометричні [5]. У водному середовищі найчастіше використовуються вольтамперометричні та кулонометричні методи, тоді як для газової фази - хроноамперометричні. Основою цих методів є реакція електроокиснення гідразину до молекулярного азоту, яка може реалізовуватись на електродах, виготовлених як із металевих, так і з вуглецевих матеріалів.

Для вимірювання концентрації гідразину зазвичай використовують техніку лінійного або сталого потенціалу з реєстрацією струмового сигналу, пропорційного вмісту аналіту. У випадках газових сенсорів перевагу надають амперометричним датчикам, які працюють при сталому потенціалі, відповідному до області граничного дифузійного струму. Сигнал, що формується, дозволяє з високою точністю оцінити концентрацію гідразину в широкому діапазоні – від 10^{-1} до 10^{-9} моль/л. Такий підхід забезпечує не лише надійність аналізу, а й можливість його інтеграції в автоматизовані системи моніторингу як у лабораторних, так і польових умовах.

Окислення гідразину відбувається за реакціями:

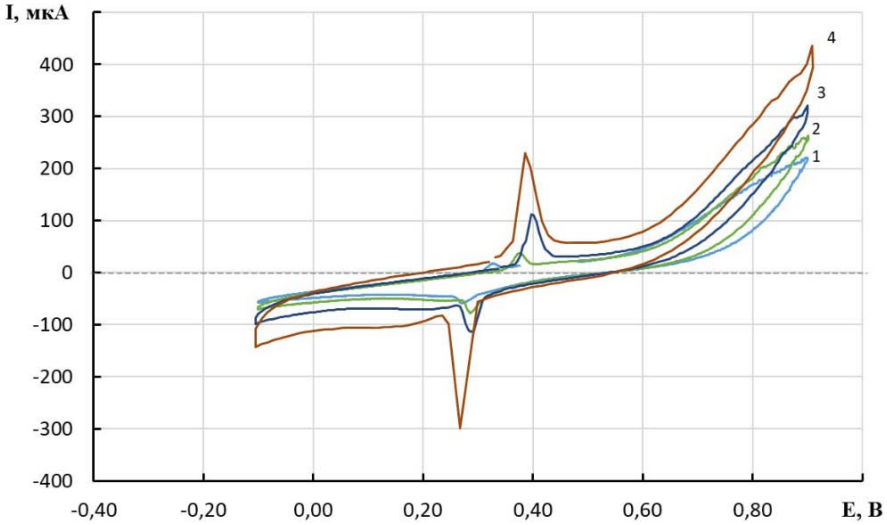
$$N_2H_4 + 4OH^- \rightarrow N_2 + 4H_2O + 4e \quad (1),$$
$$N_2H_5^+ \rightarrow N_2 + 5H^+ + 4e \quad (2).$$

Окисно-відновні властивості гідразину істотно залежать від pH середовища, оскільки за pH > 8 переважає молекулярна форма N_2H_4, тоді як за pH < 5 основною формою є іон гідразинію $N_2H_5^+$. У діапазоні pH 5…8 обидві форми співіснують у різних співвідношеннях. Така залежність впливає на стабільність вимірювань концентрації гідразину, адже реакція (2) супроводжується підкисленням середовища та має високу перенапругу. Для надійного визначення вмісту гідразину необхідно використовувати електроліт, що забезпечує стабільні умови, зокрема стале значення pH.

Вибір електроліту для електрохімічного сенсора повинен враховувати стійкість розчину в умовах зміни температури та вологості. Водні розчини лугів є непридатними через взаємодію з вуглекислим газом атмосферного повітря (близько 0,03%), що призводить до карбонізації і втрати гомогенності електроліту. Також розчини кислот обмежено придатні, з огляду на переважання вмісту іонної форми $N_2H_5^+$ у кислому середовищі та супутні ускладнення функціонування електрохімічної комірки.

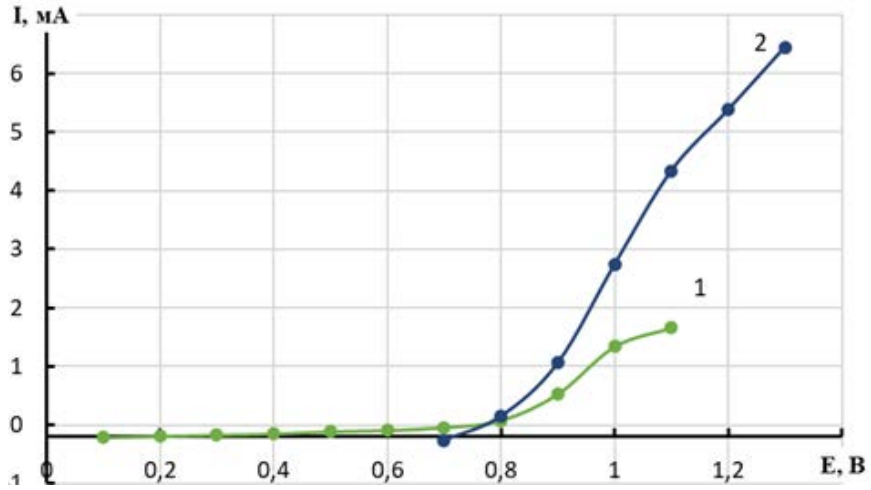
З огляду на зазначене, розробка сенсора для визначення гідразину у газовому середовищі є складною задачею, що вимагає ретельного вибору всіх компонентів електрохімічної системи. У даній роботі досліджено електроди Ti/RuO_2, які демонструють чутливість до гідразину. Такі електроди виготовляли шляхом нанесення 0,2 г порошку титану ПТЕМ, активованого діоксидом рутенію (0,1 г RuO_2 на 1 г), на титановий струмопідвід. Товщина електроду становила ~0,25 мм, діаметр – 15 мм. Електролітом слугував 20%-вий розчин хлориду літію (LiCl), стійкий до впливу CO_2.

Вольтамперометричні дослідження проводили у триелектродній комірці з використанням потенціостату PGStat500n. За даними поляризаційних кривих (рис. 1), у присутності гідразину на Ti/RuO_2-електроді фіксуються катодні піки за потенціалів 0,25…0,3 В та анодні піки близько 0,4 В. Зменшення швидкості розгортки потенціалу призводить до зменшення амплітуди піків та їх зміщення в анодну сторону, що свідчить про оборотний характер процесу. Однак, окиснення гідразину, згідно з рівняннями (1) та (2), є незворотнім. Спостережувані піки можуть свідчити про зміну стехіометричного складу оксиду рутенію, з чим пов'язане й зміщення екстремумів на стаціонарних кривих (рис. 2). Гідразин активує цей процес, але механізм явища залишається нез'ясованим та потребує подальших досліджень.



Швидкість розгортки потенціалу, мВ/с : 1 – 5; 2 – 10; 3 –25; 4 – 50.

***Рисунок 1**. Циклічні вольтамперні криві, отримані на Ti/RuO_2–електроді. Розчин електроліту 20 % LiCl, концентрація N_2H_4·HCl 0,77 ммоль/л*



Концентрація N_2H_4·2HCl, ммоль/л: 1 – 0; 2 –8.

***Рисунок 2.** Анодна поляризаційна крива, отримана за стаціонарних умов на Ti/RuO_2 – електроді. Розчин електроліту 20% LiCl*

Особливістю процесу окиснення гідразину була зміна pH електроліту - з 5,6 до 2,3 залежно від кількості пропущеного заряду. З метою стабілізації pH в систему було введено карбонат літію, що створює лужне середовище внаслідок гідролізу та не змінює істотно іонного складу електроліту.

Порівняльне дослідження електрохімічної поведінки електродів (рис. 3) показало, що на електродах з платинованого титану спостерігається підвищення струму за потенціалів 0,8 В, що обумовлено утворенням фазових оксидних шарів. На діоксиднорутенієвому електроді зростання струму спостерігається за потенціалів позитивніше 1,1 В. Для всіх електродів характерна висока перенапруга анодних процесів.

Отже, було встановлено, що Ti/RuO_2-електрод забезпечує виражену чутливість до концентрації гідразину та може бути використаний для визначення вмісту сполук.

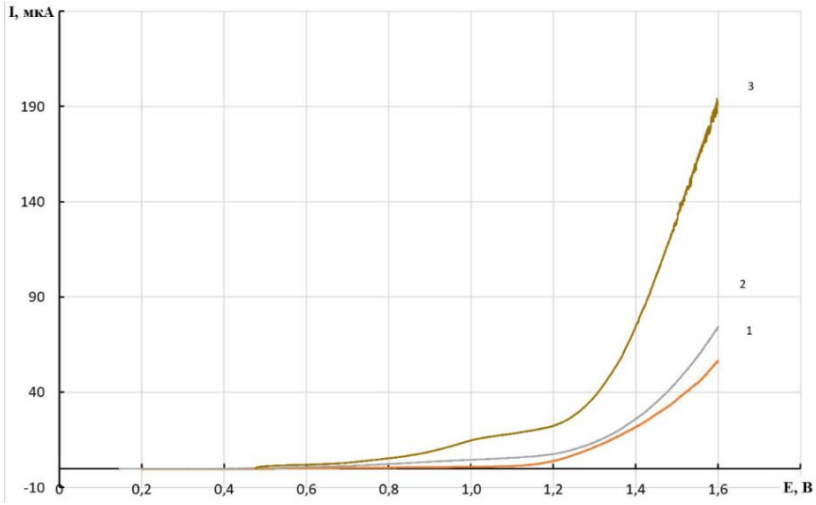


Рисунок 3. *Циклічні вольтамперні криві, отримані на титановому (1), Ti/RuO_2 (2) та Ti/Pt (3) електродах. Розчин електроліту 20% LiCl з додаванням карбонату літію. Швидкість розгортки потенціалу 0,1 мВ/с*

Розроблено електрохімічну триелектродну комірку таблеткового типу для визначення гідразину у повітрі. Комірка розроблена на кафедрі ТЕХВ НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Робочий електрод комірки містив 0,2 г порошку Ti, активованого RuO_2, електрод порівняння – суміш 6 г порошків титану та 0,5 г порошку Ag/AgCl, а також допоміжний електрод – 0,2 г порошку Ti/Pt. Електроди розділено сепаратором на основі порошків 0,2 г SiO_2, 0,4 г ФТ-4 і 0,2 г Li_2CO_3. Комірку просочено стабілізованим розчином 20 % хлориду літію (pH 8,2) та герметизовано фторопластовою газопроникною плівкою. Для вимірювань потенціал чутливого електрода встановлювали на рівні 0,7 В (відносно електроду порівняння).

Газоподібний гідразин дозували за допомогою спеціальної установки (рис.4), в якій повітря (24 $м^3$/год) подавали побудником витрат – мембранним компресором (5) в камеру змішування (13), в яку завдяки молекулярній дифузії через фторопластову мембрану (12) надходить гідразин. Витрату повітря регулювали ротаметром (6). Потім газоповітряна суміш подається до адаптера (7), в якому знаходиться сенсор (8). Сенсор з'єднували із потенціостатом (9), роботу якого контролювали за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення. Таким чином, забезпечено контрольовану подачу гідразину до поверхні чутливого електрода для подальшого аналізу.

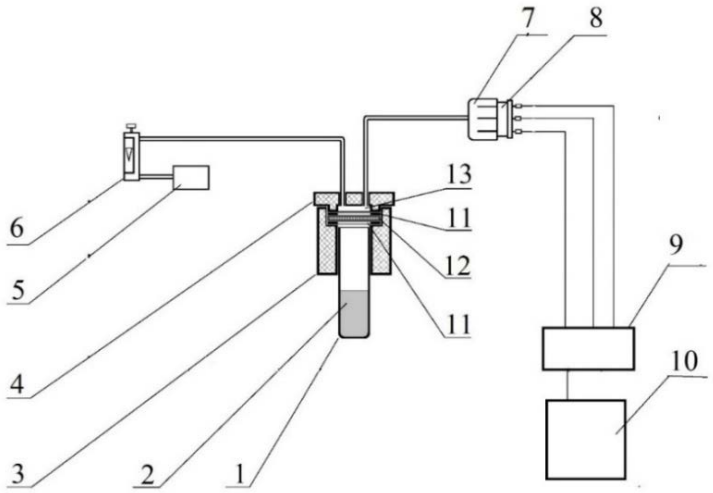


Рисунок 4. *Схема установки динамічного дозування газо-повітряної суміші: 1 – дозатор; 2 – розчин N_2H_4·HCl; 3, 4 – корпус дозатора з притискною кришкою; 5 – мембранний компресор; 6 – регулятор витрат (ротаметр); 7 – адаптер; 8 – сенсор; 9 – потенціостат PGStat500n; 10 – персональний комп'ютер; 11 – герметизуючі кільця; 12 –газопроникна плівка; 13 – камера змішування*

В результаті проведених вимірювань встановлено, що при концентрації гідразину в газовій суміші, що становила 52 мг/м^3, сенсор з діоксиднорутенієвим електродом дозволяє спостерігати вихідний сигнал та його динаміку в часі (рис. 5). На основі аналізу залежності встановлено, що чутливість сенсора складає 3,46 мкА/(мг/м^3). Параметр швидкодії, оцінений з часом досягнення 90% стаціонарного сигналу ($\tau_{0,9}$), склав близько 120 с, що може вказувати на придатність сенсора до моніторингу концентрації гідразину в режимі реального часу.

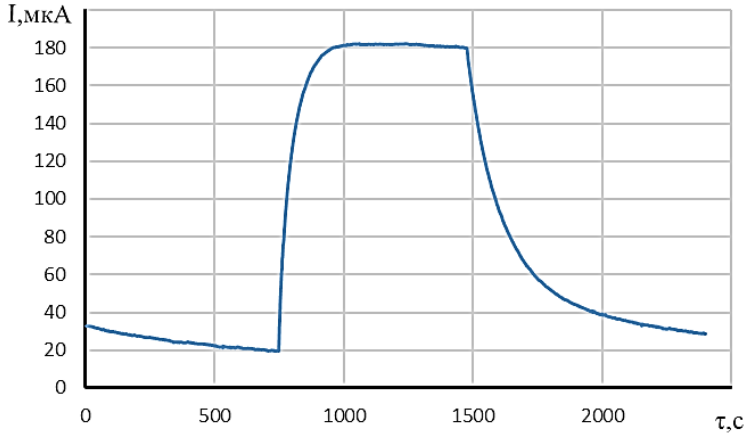


Рисунок 5. *Зміна струмового сигналу сенсора з діоксиднорутенієвим електродом у часі. Концентрація гідразину 52 мг/м^3. Потенціал робочого електрода 0,7 В відносно Ag/AgCl електрода*

Висновки. Показано, що в нейтральний розчинах електрохімічне окиснення гідразину на титанових електродах, модифікованих діоксидом рутенію (Ti/RuO_2), за стабільного потенціалу перебігає зі зменшенням сили струму у часі, що вказує на зниження швидкості

реакції. Така поведінка електрода обумовлена зменшенням pH електроліту в процесі окиснення гідразину, що призводить до зміни виду активного реагенту: з нейтральної молекули N_2H_4 на протоновану $N_2H_5^+$, яка є менш реакційно здатною.

Запропоновано електрохімічну систему визначення гідразину в повітряному середовищі, засновану на використанні сенсора із титановим електродом, активованим діоксидом рутенію. Така система демонструє задовільні аналітичні характеристики та може бути вдосконалена в подальших дослідженнях з метою розробки ефективних сенсорів для моніторингу гідразину в різноманітних природних та техногенних умовах.

Література

1. Рада ООН з прав людини визнала право людей на чисте довкілля. // *УНІАН. Новини України*. 2021, 9 жовтня. URL: https://www.unian.ua/ecology/rada-oon-z-prav-lyudini-viznala-pravo-lyudey-na-chiste-dovkillya-11572180.html (дата звернення: 01.05.2025).

2. U.S. Department of Health and Human Services; Public Health Service; Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *Toxicological Profile for Hydrazine*. September 1997.

3. Arkhipov O. P., Bugaenko V. L., Kabakchi S. A., Pashevich V. I. Thermal and radiation characteristics of hydrazine in the primary loop of nuclear power plants with water-cooled, water-moderated reactors. *Atomic Energy*. 1997. Vol. 82, No. 2. P. 92–98.

4. Guo L., Matysik F.-M., Gläser P., Engewald W. Determination of hydrazine, monomethylhydrazine, 1,1-dimethylhydrazine, and 1,2-dimethylhydrazine by nonaqueous capillary electrophoresis with amperometric detection. *Electrophoresis*. 2005. Vol. 26, No. 15. P. 3341–3348. https://doi.org/10.1002/elps.20050018

5. Чвірук В. П., Поляков С. Г., Герасименко Ю. С. *Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ*: монографія. — Київ: Академперіодика, 2007. — 324 с.

METAL OXIDE ELECTRODE FOR THE DETERMINATION OF HYDRAZINE COMPOUNDS

Alona TARASOVA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0005-0680-838X

Andrii KUSHMYRUK
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-8167-6277

Oleksii KOSOHIN
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-8379-9580

Abstract

The work is devoted to establishing the possibility of using metal oxide electrodes as components of electrochemical systems – gas sensors used to determine the concentration of hazardous substances in gas industrial and man-made environments. The possibility of using a titanium electrode activated by a layer of ruthenium dioxide as a sensitive electrode of an amperometric sensor is shown. An electrochemical system suitable for the determination of hydrazine in the air environment is proposed.

Keywords: hydrazine; ruthenium dioxide; lithium chloride; oxidation; gas sensor.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.327164

MODELING THE PYROLYSIS OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE USING THE REAXFF FORCE FIELD

Hlib TETERIATNYKOV[1], Olena IVANENKO[1], Anton KARVATSKII[1], Oleksii TOMIN[2]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
Beresteiskyi Ave, 37, Kyiv, 03056, Ukraine
[2]*Aalto University*
Otakaari 1, 02150 Espoo, Finland
e-mail: glibteteryatnikov@gmail.com

Abstract

The pyrolysis process of high-density polyethylene (HDPE) was investigated using molecular dynamics simulation with the reactive force field ReaxFF. The aim was to determine the qualitative and quantitative composition of the gaseous pyrolysis products and to identify the optimal temperature regimes that maximize the yield of valuable products while minimizing environmental impact. The simulations were carried out using the Materials Studio and LAMMPS software packages. An atomistic model of HDPE with added oxygen molecules was created, followed by geometry optimization, energy minimization, and equilibration in the NVT ensemble at 300 K. Pyrolysis was simulated at temperatures ranging from 600 °C to 2000 °C. The results suggest that 1000 °C is the optimal temperature for the thermal decomposition of HDPE. These findings confirm the effectiveness of ReaxFF in analyzing the chemical processes of pyrolysis and can be used in the development of polymer waste recycling technologies.

Key words: *pyrolysis, high-density polyethylene, molecular dynamics, ReaxFF, gaseous products.*

The problem of polymer waste disposal, particularly high-density polyethylene (HDPE), is highly relevant due to environmental threats and the continuously increasing use of polymer materials in industry, agriculture, construction, and daily life. Every year, millions of tons of plastic waste are generated worldwide, a significant portion of which is not further recycled. One of the promising methods of recycling is pyrolysis — the thermal decomposition of polymers in an oxygen-free environment [1]. This process enables the production of gaseous, liquid, and solid products [2], which can be used as secondary energy resources or raw materials for the chemical industry.

Modern approaches to studying pyrolysis are based on numerical modeling using molecular dynamics (MD) and reactive force fields such as ReaxFF. This allows for the analysis of molecular behavior at the atomistic level and the prediction of chemical reaction pathways with high accuracy and relatively low computational cost.

Preparation for MD modeling included constructing the initial atomistic configuration, consisting of ten polyethylene chains ($C_{100}H_{202}$) and 100 oxygen (O_2) molecules randomly placed in a cubic cell with a set density of 0.99 g/cm³. Random amorphous structures of PE–O_2 are presented in Figure 1. Model creation and preprocessing were carried out in the Materials Studio software environment [3]. To obtain the conformation of physical significance, geometric optimization, energy minimization and structural relaxation was performed for 5 ns using the canonical NVT ensemble at temperature 300 K. To enable large-scale reactive molecular dynamics simulations, the optimized structures were exported from Materials Studio and converted into the LAMMPS [4] data format using the msi2lammps interface. This included the generation of topology, atomic

coordinates, and force field assignments compatible with the ReaxFF potential. Pyrolysis modeling was conducted using LAMMPS with the ReaxFF reactive potential, which accounts for interactions among carbon, hydrogen, and oxygen atoms. The use of a reactive force field made it possible to dynamically track bond formation and breaking events, capturing the chemical evolution of the system in real time. Custom input scripts were then prepared to define simulation parameters such as ensemble settings, temperature control, and data output intervals. These scripts also specified the use of the reaxff module to monitor species evolution during the pyrolysis process, providing detailed insights into reaction pathways and product formation dynamics.

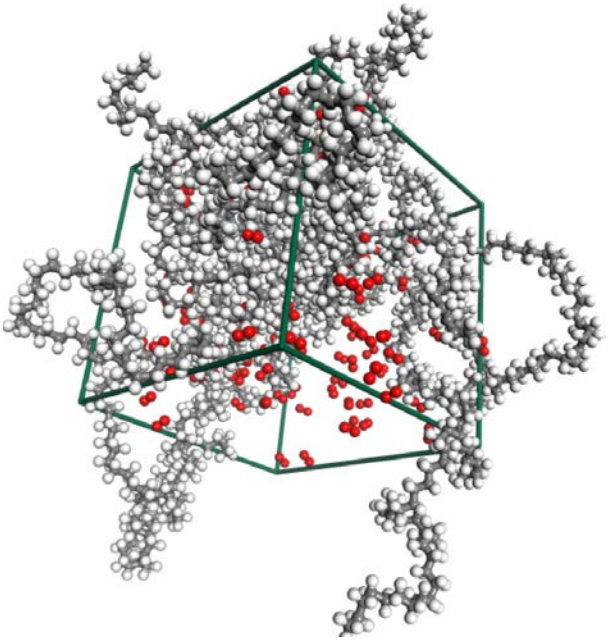


Figure 1. *Random amorphous structures of PE–O_2 constructed in Materials Studio*

The calculations were performed at six temperatures: 600 °C, 800 °C, 1000 °C, 1400 °C, 1800 °C, and 2000 °C. Each simulation lasted 250 ps with a time step of 0.5 fs. To maintain a stable temperature in the system, a Nose–Hoover thermostat with a damping constant of 50 fs was used [5]. Data on molecule formation was recorded every 1000 steps and processed to construct time-dependent concentration profiles of the gaseous products.

Based on the simulation results, time and temperature-dependent profiles of the main gaseous products (H_2, CH_4, CO, C_2H_2, C_2H_4) were built. The analysis showed that after the initial phase (up to 60 ps), the molecular system enters a phase of active molecular decomposition. During this period, a sharp increase in the amount of hydrogen, ethylene, and other compounds is observed, resulting from the breakdown of polymer chains and subsequent reactions. A comparison of the results at different temperatures revealed that the highest hydrogen yield occurs at 1800 °C and 2000 °C, while the optimal compromise between energy consumption and product quality is achieved at 1000 °C.

An increase in temperature beyond this point leads to a decrease in the amount of methane and carbon monoxide, which can be attributed to their further decomposition and participation in secondary reactions. At 2000 °C, the yield of carbon monoxide (CO) drops substantially—by about 79% relative to 1000 °C, while at 1800 °C it decreases by approximately 37% compared to 1000 °C, indicating a clear inverse relationship between temperature and CO production at higher thermal conditions. The amount of methane (CH_4) also shows a slight decrease, suggesting the presence of active secondary reactions. In contrast, no significant temperature-dependent trend was observed in the yield of ethylene (C_2H_4). At 600 °C and 800 °C, no significant degradation of the polyethylene matrix was observed, which is explained by the high thermal stability of HDPE and insufficient energy to activate chemical reactions within the given simulation timescale. These temperatures proved ineffectiveness for generating gaseous products over the 250 ps simulation period.

In result, the application of molecular dynamics modeling with the ReaxFF force field enables a highly detailed study of the pyrolysis processes of high-density polyethylene. It was established that the most optimal temperature regime is 1000 °C, as it provides the most favorable results in terms of product yield - such as H_2, CH_4, C_2H_4, and CO - while maintaining moderate energy consumption and limiting the formation of harmful byproducts compared to other temperature regimes. The obtained results open prospects for the practical use of numerical modeling in the development and optimization of industrial processes for the thermal recycling of polymer waste. Future research will include the analysis of the pyrolysis of other polyethylene and polystyrene products, as well as simulations that consider the presence of other polymers and additives.

References

1. M. Devi, S. Rawat, and S. Sharma, "A comprehensive review of the pyrolysis process: from carbon nanomaterial synthesis to waste treatment," Oxford Open Materials Science, vol. 1, no. 1. Oxford University Press (OUP), Nov. 30, **2021**. https://doi.org/10.1093/oxfmat/itab014

2. H. Zhou, Y. Long, A. Meng, Q. Li, and Y. Zhang, "The pyrolysis simulation of five biomass species by hemi-cellulose, cellulose and lignin based on thermogravimetric curves," Thermochimica Acta, vol. 566. Elsevier BV, pp. 36–43, Aug. **2013**. https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.04.040

3. "Materials studio" Dassault Systèmes, https://www.3ds.com/products/biovia/materials-studio (accessed Apr. 13, 2025).

4. "LAMMPS" Molecular Dynamics Simulator, https://www.lammps.org/#gsc.tab=0 (accessed Apr. 13, 2025).

5. D. J. Evans and B. L. Holian, "The Nose–Hoover thermostat," The Journal of Chemical Physics, vol. 83, no. 8. AIP Publishing, pp. 4069–4074, Oct. 15, **1985**. https://doi.org/10.1063/1.449071

МОДЕЛЮВАННЯ ПІРОЛІЗУ ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ СИЛОВОГО ПОЛЯ REAXFF

Гліб ТЕТЕРЯТНИКОВ
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0008-0753-5055

Олена ІВАНЕНКО
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6838-5400

Антон КАРВАЦЬКИЙ
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2421-4700

Олексій ТОМІН
Університет Аалто
Otakaari 1, 02150 Espoo, Фінляндія
https://orcid.org/0000-0002-9927-6984

Анотація

Досліджено процес піролізу поліетилену високої щільності (ПВЩ) за допомогою молекулярно-динамічного моделювання з використанням реакційного силового поля ReaxFF. Метою було визначення якісного та кількісного складу газоподібних продуктів піролізу та оптимальних температурних режимів для максимізації виходу цінних продуктів і мінімізації шкідливого впливу на довкілля. Моделювання виконано в програмних комплексах Materials Studio та LAMMPS. Створено атомістичну модель ПВЩ із додаванням молекул кисню, проведено її геометричну оптимізацію, енергетичну мінімізацію та врівноваження в NVT ансамблі при 300 K. Піроліз моделювався при температурах від 600 °C до 2000 °C. Отримані результати дозволяють рекомендувати температуру 1000 °C як оптимальну для термічного розкладу ПВЩ. Результати підтверджують ефективність ReaxFF для аналізу хімічних процесів піролізу та можуть бути використані для розробки технологій утилізації полімерних відходів.

Ключові слова: піроліз, поліетилен високої щільності, молекулярна динаміка, ReaxFF, газоподібні продукти.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329661

ANALYSIS OF MACRONUTRIENTS DISTRIBUTION IN MIXED BIODEGRADABLE MUNICIPAL WASTE (MBMW) COMPOST: A CASE STUDY OF KAUNAS, ALYTUS, AND DAUGAVPILS REGIONS

Bilal TOUSEEF, Gintaras DENAFAS
Kaunas University of Technology
Radvilėnų pl. 19, Kaunas, LT-50254, Lithuania
email: bilal.touseef@ktu.edu

Abstract

Mixed Biodegradable Municipal Waste (MBMW) compost is rich in nutrient content and hence could prove to be of immense valuable in sustainable agriculture and soil fertility. For this purpose, the ratio of needed macronutrients (Calcium (Ca), potassium (K), magnesium (Mg), and phosphorus (P)) in different particle sizes in compost must be attained for maximum yield. Here, macronutrients composition of three sites with different fractions of MBMW compost samples are analyzed for Kaunas and Alytus, Lithuania, and Daugavpils, Latvia. The results demonstrate intense particle size-dependent regional difference in nutritional content. That serves to confirm the importance of particle size governing nutritional availability. The findings indicate that finer fractions (500 µm to 200 µm) have greater phosphorus and potassium, while coarser particles (> 5 mm) have greater calcium and magnesium. These findings are significant to improve MBMW compost nutrients recycling capacity as well as its utilization in agriculture in the future.

Key words: *mixed biodegradable municipal waste (MBMW), macronutrients composition, compost, particle size.*

Mixed Biodegradable Municipal Waste (MBMW) consist of considerable amount of organic waste and can be utilized to generate compost to sustain agriculture and treat waste disposed at landfill. MBMW composting converts it into a nutrient value product that can be utilized to promote plant growth through enhanced soil fertility, besides diminishing environmental effects on waste management. MBMW mixture, on the other hand, vary widely that is based on different factors such as its origin, native culture, and waste physical characteristics [1].

Macronutrients like calcium (Ca), potassium (K), magnesium (Mg), and phosphorus (P) all have significant role in plant development [2]. Availability of these nutrients in compost determine its efficiency as a soil conditioner. Particle size of compost also effects availability and leaching of these constituents to soil. Large particles slowly release the nutrients as they degrade, while smaller particles with high decomposition rate supply easily available nutrients to the soil [3].

Being an EU Directive (2008/98/EC), mechanical biological treatment (MBT) plants in different parts of Lithuania and Latvia are generating compost from municipal solid waste after a separation of the non-biodegradable fractions [4]. This research compares macronutrients composition of

MBMW compost samples from Lithuania and Latvia in different particle sizes > 5 mm, 2.5 mm, 1 mm, 500 µm and 200 µm. The objective is to establish regional nutrients trends as well as the influence of particle size on available nutrients for utilization, providing a general assessment for future use in agriculture.

MBMW compost samples were taken from two location in Lithuania, i.e., Kaunas and Alytus MBT facilities, and one location in Latvia, i.e., Daugavpils MBT facility. The samples were initially taken from composting facilities in the said locations, and then dried at 105°C for 8 hours in the laboratory to remove moisture. The dried samples were sieved using standard sieves to get six fractions in particle size: > 5 mm, 5 mm, 2.5 mm, 1 mm, 500 µm, and 200 µm.

Macronutrient content in compost was quantified through microwave digestion in triplicates for each sample. Aqua regia was utilized for sample digestion. The digestion of compost entitled heating the samples within a microwave digestion system to rupture the organic matrix and extract the nutrients into analyzable solution. After digestion, the samples were analyzed for calcium (Ca), potassium (K), magnesium (Mg), and phosphorus (P) by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES), a highly sensitive method that allows accurate determination of these elements in the sample. The standard solutions were used to calibrate the ICP-OES, and the readings were made at characteristics wavelengths for each element for accuracy and reliability.

The four macronutrient concentrations were considerably different in the three study areas. The mean concentration of studied nutrients in the above-mentioned particle size fractions for each region is shown in Table 1.

The results agree with earlier observations of how particle size contribute to nutrient release in compost. Smaller particles have more surface area, and it has been shown to results in higher decomposition rates and fast release of nutrients [5]. In our finding, fine fractions (200 µm and 500 µm) from every region have higher concentrations of phosphorus and potassium. Thus, they can be used as readily available nutrients from these regions. In contrast, the increase in calcium and magnesium content in larger particles (> 5 mm) indicate that these fractions will be less available in the short term as a result of lower decomposition rates. However, they could act as a long term-nutrient pool by slowly releasing the nutrients to soil as the compost ages over time [3].

Table 1. Macronutrient Content Distribution in MBMW Compost Samples from Kaunas, Alytus, and Daugavpils MBT facilities.

Region	Size	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	P (mg/kg)
Kaunas	> 5 mm	43858.571	3443.967	18565.903	652.59
	5 mm	13727.11	2857.893	1946.021	1108.495
	2.5 mm	55491.0195	4888.947	4669.754	1650.461
	1 mm	41058.927	3770.838	4991.746	1494.261
	500 µm	28785.081	2761.078	4985.881	1495.727
	200 µm	27828.378	3326.606	4618.827	2135.382
Alytus	> 5 mm	63197.342	5215.085	4732.1423	1721.032
	5 mm	40352.249	5302.161	5283.129	2738.026
	2.5 mm	164837.823	13861.318	12283.175	5465.602
	1 mm	118211.35	16893.686	12938.592	6758.361
	500 µm	90200.008	14141.727	12121.399	6166.188

Region	Size	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	P (mg/kg)
Daugavpils	200 µm	115785.538	19106.368	16957.143	7523.354
	> 5 mm	72344.067	8698.911	12366.53	3177.594
	5 mm	132247.099	9708.919	24489.771	3233.853
	2.5 mm	106637.008	9330.254	14847.063	4628.984
	1 mm	101818.169	7621.616	13824.171	3587.438
	500 µm	75819.744	6668.811	11833.579	3516.648
	200 µm	90842.124	7994.673	14984.146	4136.595

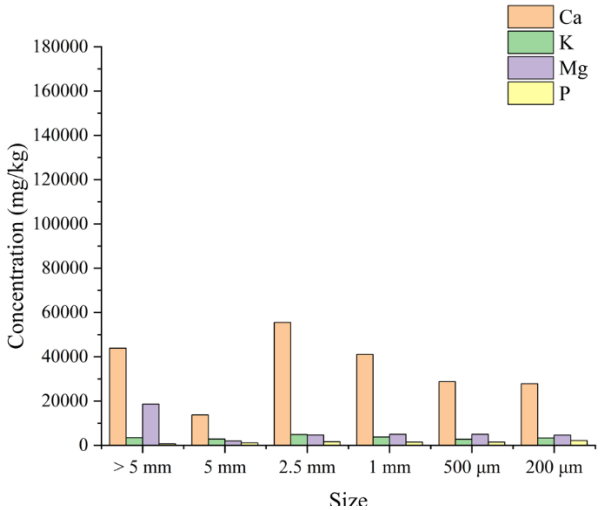


Figure 1: *Macronutrient Content Distribution in MBMW Compost Samples f rom Kaunas MBT facility*

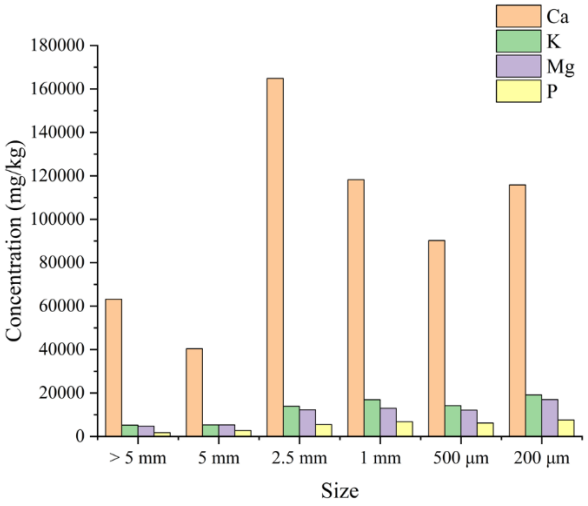


Figure 2. *Macronutrient Content Distribution in MBMW Compost Samples from Alytus MBT facility.*

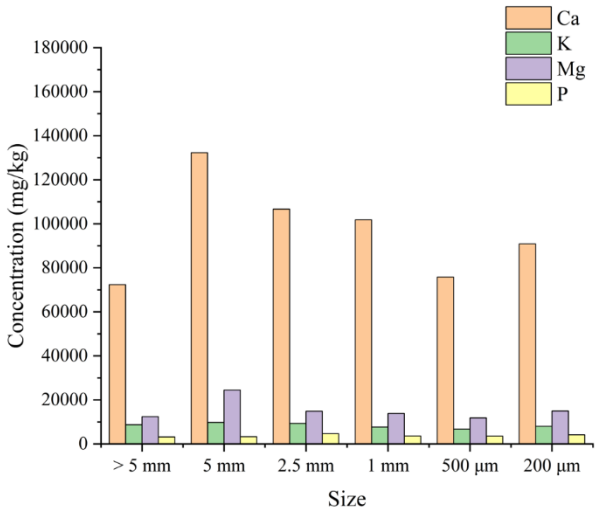


Figure 3. *Macronutrient Content Distribution in MBMW Compost Samples from Daugavpils MBT facility*

This study highlights the size-dependent variability in macronutrient concentrations in MBMW compost from Kaunas, Alytus, and Daugavpils MBT facilities. The findings indicate that the finer particle sizes are richer in potassium and phosphorus content, while larger particles contain more calcium and magnesium content. These results can help the authorities for better waste management and composting strategies to improve the quality of compost for agriculture use. Further research is needed over the time to assess the bioavailability of these nutrients and their long-term impact on soil health.

References

1. Kupper, T.; Bürge, D.; Bachmann, H.J.; Güsewell, S.; Mayer, J. Heavy Metals in Source-Separated Compost and Digestates. Waste Management 2014, 34, 867–874. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2014.02.007
2. Ponette-González, A.G.; Ewing, H.A.; Fry, M.; Young, K.R. Soil and Fine Root Chemistry at a Tropical Andean Timberline. CATENA 2016, 137, 350–359. https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2015.10.014
3. O'Dell, R.E.; Claassen, V.P. 18. Restoration and Revegetation of Harsh Soils. Serpentine, University of California Press 2020, 383–414. https://doi.org/10.1525/9780520948457-021/HTML.
4. SAVEYN, H.; EDER, P. End-of-Waste Criteria for Biodegradable Waste Subjected to Biological Treatment (Compost & Digestate): Technical Proposals., Publications Office of the European Union 2014, 312. https://doi.org/10.2791/6295
5. Głąb, T.; Gondek, K; Mierzwa-Hersztek, M. Enhancing Soil Physical Quality with Compost Amendments: Effects of Particle Size and Additives. Agronomy 2025, 15, 458. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY15020458/S1

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ МАКРОЕЛЕМЕНТІВ У КОМПОСТІ ЗМІШАНИХ МУНІЦИПАЛЬНИХ БІОРОЗКЛАДНИХ ВІДХОДІВ (ЗМБВ): НА ПРИКЛАДІ РЕГІОНІВ КАУНАСА, АЛИТУСА ТА ДАУГАВПІЛСА

Білал ТУСІФ
Каунаський технічний університет
Radvilėnų pl. 19, Kaunas, LT-50254, Литва

Гінтарас ДЕНАФАС
Каунаський технічний університет
Radvilėnų pl. 19, Kaunas, LT-50254, Литва
https://orcid.org/0000-0002-6834-1026

Анотація

Компост із змішаних муніципальних біорозкладних відходів (ЗМБВ) має високу концентрацію поживних речовин і, отже, може бути надзвичайно цінним для сталого сільського господарства та збільшення родючості ґрунтів. З цією метою необхідно визначити співвідношення ключових макроелементів (кальцію (Ca), калію (K), магнію (Mg) і фосфору (P)) у частинках компосту різного розміру для досягнення максимального врожаю. У цьому дослідженні проаналізовано склад макроелементів у зразках компосту ЗМБВ із трьох регіонів — Каунас і Алітус (Литва), а також Даугавпілс (Латвія), з урахуванням різних фракцій за розміром частинок. Результати демонструють виражену регіональну різницю в поживному

складі, що залежить від розміру частинок і підтверджує важливість цього параметру для доступності поживних речовин.

Встановлено, що дрібні фракції (від 500 мкм до 200 мкм) містять більше фосфору і калію, тоді як грубіші частинки (> 5 мм) характеризуються вищим вмістом кальцію та магнію. Ці результати є важливими для підвищення здатності компосту ЗМБВ до повторного використання поживних речовин і його ефективнішого застосування в сільському господарстві в майбутньому.

Ключові слова: склад макроелементів, компост, розмір частинок, змішані муніципальні біорозкладні відходи (ЗМБВ).

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.327131

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES

Stanislav USENKO[1], Yulia NOSACHOVA[1], Yevhenii SHAPOVALOV[2], Maksym KLYMENKO[2], Sergey ZHADAN[2]
[1] *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
Beresteiskyi Ave, 37, Kyiv, 03056, Ukraine
[2] *The National University of Food Technologies*
Volodymyrska St, 68, Kyiv, 01033, Ukraine
e-mail: farkry17@gmail.com

Abstract

Anaerobic digestion (AD) is a process that has found increasing relevance for sustainable waste management and bioenergy production. Nevertheless, microbial interactions and process dynamics make it challenging to maximize and predict biogas production. Recent breakthroughs in artificial intelligence (AI), particularly in artificial neural networks (ANN), have provided new opportunities for solving these problems and drastically enhanced process optimization, predictive capability, as well as perpetual stability. This paper aims to provide a review of recent literature covering the application of AI, specifically Artificial Neural Networks (ANN), integrated with various optimization algorithms, including Genetic Algorithms (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), in anaerobic digestion systems from 2022 to 2024. The results of the evaluation demonstrate that ANN models exhibit a significant improvement over conventional kinetic-based approaches, characterized by lower prediction errors, higher biogas production, and greater robustness.

Keywords: *Anaerobic digestion, Artificial intelligence, Artificial neural networks, Genetic algorithm, Particle swarm optimization, Biogas, Process optimization, Renewable energy.*

Introduction: Anaerobic digestion (AD) is getting more important as an essential sustainable waste management and energy production technology. It is a complex set of microbial processes through which organic matter is transformed into biogas. The intrinsic complexity, nonlinearity, and variability in the anaerobic digestion process make it difficult to predict and optimize continuous, stable, and efficient biogas production. Recently, Artificial intelligence (AI), primarily through the use of artificial neural networks (ANNs), has been recognized as a strong modeling and optimization tool, as it can deal with complex nonlinearities and increase predictive precision. Conventional empirical/kinetic modeling approaches for anaerobic digestion are typically too simplistic to properly capture the complex dynamics. As such, the advent of AI-based methods is a leap, providing flexible, reliable and very accurate predictions models. A systematic review of the recent literature on Artificial intelligence (AI) and, in particular, ANN, Genetic Algorithms (GA), as well as Particle Swarm Optimization (PSO) application for anaerobic digestion.

Methods: This review evaluates the published literature (2022–2024) on applications and performances of various AI methodologies relevant to anaerobic digestion processes with a comprehensive view. That is, the review specifically emphasizes artificial neural nets (ANNs) and a fuse with some other advanced optimization algorithms such Genetic Algorithms (GA) a Particle Swarm Optimization (PSO) The database search was done using Scopus, ScienceDirect and Web of Science via bold keywords "anaerobic digestion", "artificial intelligence", "ANN", "genetic algorithm" and "particle swarm optimization". The major results and methodologies, as well as comparison reviews of related study were summed up to provide an emerged state-of-the-art and limitations of research.

Results: The reviewed literature suggests that ANN models have made significant progress in prediction and optimization for some anaerobic digestion applications. Chen et al. (2022) utilized integrated anaerobic-aerobic bioreactors and artificial neural networks (ANNs) with Bayesian regularization and backpropagation to significantly enhance the efficient removal of chemical oxygen demand (COD) and methane yields [1].

Comparable analyses have demonstrated that when combined with GA and PSO optimization algorithms, ANN-based models (GA-assisted ANNs and PSO-assisted ANNs) exhibit higher prediction accuracy than classical kinetic modeling approaches. For example, Avinash and Mishra (2024) reported that Artificial Neural Networks (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) outperform traditional kinetic models, yielding significantly lower root mean square errors (RMSE) and higher correlation coefficients (R^2) in prediction. Avinash & Ramu (2021) and Mougari et al. (2021) demonstrated that the integration of ANN and GA to estimate cumulative methane yield yielded accurate results with low uncertainties, despite a background of high predictive determinism [2, 3].

Moreover, Zaied et al. (2023) used an ANN in the preliminary analysis of biogas yields from palm oil mill effluent (POME) and cattle manure co-digestion, depicting its strength in analyzing multi-variate estimates with high prediction accuracy, particularly in terms of biogas outputs. Hasanpour Seyedlar et al. (2024) used ANN-PSO models for mitigation-based biogas H2S, finding a nearly 50% reduction in sulfure content, ranging from model H2S to H_2S in biogas [4, 5].

Zhan and Zhu (2024) also confirmed their finding that ANN-GA can significantly enhance methane yield by approximately 20.6% with biochar in anaerobic digestion. Below in Picture 1, you can see the pros and cons of AI in AN [6].

The assessment highlights the remarkable benefits of ANN-based models over classical kinetic approaches, especially when combined with GA and PSO. These AI enablers effectively resolve significant issues, such as accuracy prediction, system stability, and process optimization, to achieve higher biogas output with lower operational risks. However, the applicability of such ANN models can be significantly enhanced by including additional parameters, such as microbial population dynamics, nutrient availability, reactor architecture, and feedstock properties, in addition to operating data [2, 7, 8]. At the same time, real-time self-learning corresponding ANN models that adapt themselves are an open research field with potential. AI-driven hybrid modeling approaches that combine model-based AI and mechanistic models can offer even more robust and universally applicable solutions for the inherent variability of anaerobic digestion. In Picture 2, you can see a SWOT analysis of AI in AD.

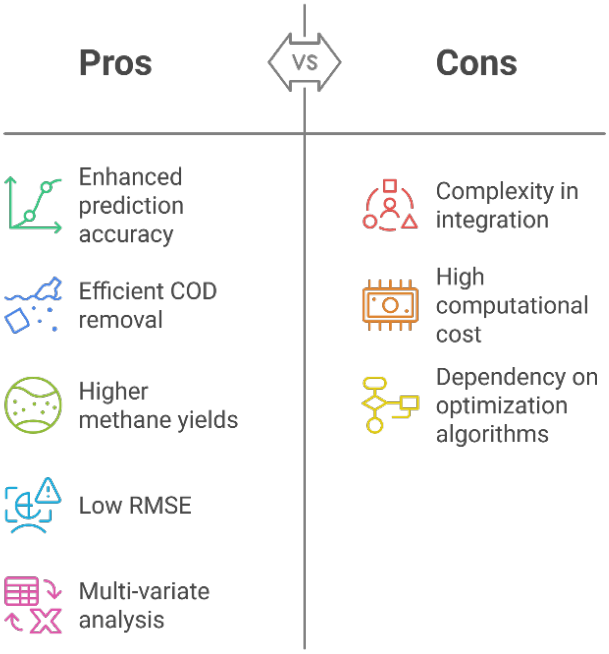


Fig 1. *Pros. And Cons of AI in AN*

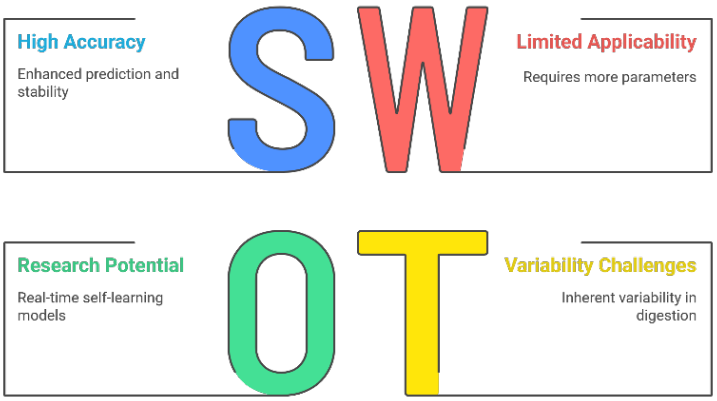


Fig.2. *SWOT analysis of AI in AD*

Conclusions: The integration of AI methodologies, specifically artificial neural networks (ANN) coupled with optimization techniques (genetic algorithms and particle swarm optimization), demonstrates clear superiority over traditional kinetic and empirical models in predicting and optimizing anaerobic digestion processes. These advancements have improved prediction accuracy, enhanced biogas production efficiency, and facilitated effective control of the anaerobic digestion process. Future research directions should prioritize the development of real-time adaptive and hybrid models to further enhance predictive capabilities and operational stability.

References:

1. Chen, W. Y., Chan, Y. J., Lim, J. W., та ін. Artificial Neural Network (ANN) Modelling for Biogas Production in Pre-Commercialized Integrated Anaerobic-Aerobic Bioreactors (IAAB). Water (Switzerland). 2022. Vol. 14, No. 9.

2. Avinash, L. S., Mishra, A. Comparative evaluation of Artificial intelligence based models and kinetic studies in the prediction of biogas from anaerobic digestion of MSW. Fuel. 2024. Vol. 367, No. October 2023. C. 131545.

3. Mougari, N. E., Largeau, J. F., Himrane, N., та ін. Application of artificial neural network and kinetic modeling for the prediction of biogas and methane production in anaerobic digestion of several organic wastes. International Journal of Green Energy. 2021. Vol. 18, No. 15. C. 1584–1596.

4. Zaied, B. K., Rashid, M., Nasrullah, M., та ін. Prediction and optimization of biogas production from POME co-digestion in solar bioreactor using artificial neural network coupled with particle swarm optimization (ANN-PSO). Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. Vol. 13, No. 1. C. 73–88.

5. Hasanpour Seyedlar, N., Zamir, S. M., Nosrati, M., та ін. H2S mitigation for biogas upgrading in a full-scale anaerobic digestion process by using artificial neural network modeling. Renewable Energy. 2024. Vol. 232, No. March 2023. C. 121016.

6. Zhan, Y., Zhu, J. Response surface methodology and artificial neural network-genetic algorithm for modeling and optimization of bioenergy production from biochar-improved anaerobic digestion. Applied Energy. 2024. Vol. 355, No. July 2023. C. 122336.

7. Chiu, M. C., Wen, C. Y., Hsu, H. W., та ін. Key wastes selection and prediction improvement for biogas production through hybrid machine learning methods. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52, No. PC. C. 102223.

8. Zhang, P., Zhang, T., Zhang, J., та ін. A machine learning assisted prediction of potential biochar and its applications in anaerobic digestion for valuable chemicals and energy recovery from organic waste. Carbon Neutrality. 2024. Vol. 3, No. 1.

ВИКОРИСТАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПРОЦЕСАХ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ

Станіслав УСЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський просп. 37, Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9412-2441

Юлія НОСАЧОВА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський просп. 37, Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6431-7128

Євгеній ШАПОВАЛОВ
Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська 86, Київ, 01601, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3732-9486

Максим КЛИМЕНКО
Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська 86, Київ, 01601, Україна

Сергій ЖАДАН
Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська 86, Київ, 01601, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7493-2180

Анотація

Анаеробне зброджування (АБ) - це процес, який набуває все більшої актуальності для сталого управління відходами та виробництва біоенергії. Тим не менш, мікробні взаємодії та динаміка процесу ускладнюють максимізацію та прогнозування виробництва біогазу. Нещодавні прориви в галузі штучного інтелекту (ШІ), зокрема, штучних нейронних мереж (ШНМ), надали нові можливості для вирішення цих проблем і значно покращили оптимізацію процесів, прогнозування, а також стабільність процесу. Метою цієї тези є огляд нещодавньої літератури, що висвітлює застосування ШІ, зокрема штучних нейронних мереж (ШНМ), інтегрованих з різними алгоритмами оптимізації, представленими генетичними алгоритмами (ГА) та оптимізацією рою частинок (PSO), в системах анаеробного зброджування в період з 2022 по 2024 рік. Результати доводять, що ШНМ-моделі демонструють значну перевагу порівняно з традиційними кінетичними підходами зі значно меншими помилками прогнозування, більшим виробництвом біогазу та більшою надійністю.

Ключові слова: анаеробне зброджування, штучний інтелект, штучні нейронні мережі, генетичний алгоритм, оптимізація рою частинок, біогаз, оптимізація процесу, відновлювані джерела енергії.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332294

APPLICATION OF LOW-SOLUBILITY DOLOMITE MINERAL FOR PHOSPHORUS RECOVERY

Thi-Hanh HA[1], Yao-Hui HUANG[2], Ming-Chun LU[1,3]
[1]*Department of Environmental Engineering, National Chung Hsing University*
Taichung 402, Taiwan
[2]*Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University*
Tainan 70101, Taiwan
[3]*Innovation and Development Center of Sustainable Agriculture, National Chung Hsing University*
Taichung 402, Taiwan
e-mail: mmclu@nchu.edu.tw

Abstract

This study aimed to determine whether seeding with low-solubility dolomite improves the efficiency, product quality, and scalability of phosphorus (P) recovery by fluidized-bed crystallization compared with an unseeded (homogeneous) mode, and to identify operating conditions that maximize recovery while yielding a reusable product. Two continuous 350-mL reactors were run in parallel under identical hydrodynamics (up-flow 30 $m \cdot h^{-1}$; surface loading 0.9 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) and chemistry designed to favor calcium phosphate formation (pH 7.7; Ca/P = 3.5): a seeded system using dolomite as heterogeneous nuclei and an unseeded control. Seeding increased crystallization of both P and Ca from about 60% to about 80%; under optimal conditions, total removals reached ~85% for P and ~92% for Ca. X-ray diffraction and Raman spectroscopy confirmed tricalcium phosphate ($Ca_3(PO_4)_2 \cdot xH_2O$) as the dominant phase in both modes, while microscopy showed that the seeded bed produced larger, denser pellets with fewer fines, simplifying solid–liquid separation and supporting scale-up. Sensitivity tests across pH 6–8.7 validated the selected set-point, and "blank" runs with dolomite alone showed minimal P removal, indicating that performance gains arise from controlled supersaturation with added calcium. The recovered P, in a stable crystalline form, is suitable for slow-release fertilizers and as feedstock for bio-ceramics and bioactive glass.

Note: *The results presented in this abstract have been published in Separation and Purification Technology as: Ha, T.H., Mahasti, N.N., Lu, M.C., and Huang, Y.H. (2022). Sep. Purif. Technol. 303, 122192. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122192*

Key words: *fluidized-bed crystallization (FBC/FBHC), seeded crystallization, unseeded crystallization, dolomite ($CaMgCO_3)_2$, phosphorus recovery, calcium crystallization, pH optimization, tricalcium phosphate ($Ca_3(PO_4)_2 \cdot xH_2O$), slow-release fertilizer, bio-ceramics.*

ЗАСТОСУВАННЯ МАЛОРОЗЧИННОГО ДОЛОМІТОВОГО МІНЕРАЛУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ФОСФОРУ

Ті-Хань ХА
Національний університет Чен Кунг,
Taichung 402, Тайвань

Яо-Хуей ХУАНГ
Національний університет Чен Кунг,
Taichung 402, Тайвань

Мін-Чун ЛУ
Національний університет Чен Кунг,
Taichung 402, Тайвань
https://orcid.org/0000-0001-5293-0718

Анотація

Метою дослідження було з'ясувати, чи підвищує внесення малорозчинного доломіту як ядер кристалізації ефективність вилучення фосфору (P) зі стічних вод шляхом кристалізації у псевдозрідженому шарі порівняно з гомогенним режимом, а також визначити режими роботи, які забезпечують максимальний ступінь вилучення та придатність отриманого продукту до повторного використання.

У дослідженні використовували два безперервні реактори об'ємом 350 мл, що працювали паралельно за однакових гідродинамічних умов (висхідний потік 30 м·год$^{-1}$; поверхневе навантаження 0,9 кг·м$^{-2}$·год$^{-1}$) і хімічних параметрів, налаштованих на утворення фосфатів кальцію (pH 7,7; Ca/P = 3,5). Було встановлено, що порівняно з гомогенним режимом застосування ядер кристалізації підвищило ступінь кристалізації як P, так і Ca приблизно з 60% до близько 80% (за оптимальних умов загальне вилучення сягало ~85% для P і ~92% для Ca). Рентгенофазовий аналіз і раманівська спектроскопія підтвердили, що домінуючою фазою в обох режимах є трикальційфосфат ($Ca_3(PO_4)_2 \cdot xH_2O$), тоді як мікроскопія показала, що у випадку використання ядер кристалізації утворюються більші й щільніші гранули з меншою кількістю тонкодисперсних частинок, що спрощує розділення твердої та рідкої фаз і сприяє масштабуванню. Перевірка в межах pH 6–8,7 підтвердила, що вибране робоче pH є оптимальним, а контрольні запуски процесу лише з доломітом засвідчили мінімальне вилучення P, що вказує: приріст ефективності зумовлений керованим перенасиченням за рахунок додавання кальцію.

Зроблено висновок, що вилучений фосфор перебуває у стабільній кристалічній формі й придатний для використання у добривах сповільненої дії, а також як сировина для виготовлення біокераміки та біоактивного скла.

Примітка: результати дослідження опубліковано в журналі Separation and Purification Technology: Ha, T.H., Mahasti, N.N., Lu, M.C., and Huang, Y.H. (2022). Sep. Purif. Technol. 303, 122192. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122192

Ключові слова: кристалізація у псевдозрідженому шарі (FBC/FBHC), досівний метод, бездосівний метод, доломіт ($CaMgCO_3)_2$, відновлення фосфору, кристалізація кальцію, оптимізація pH, трикальційфосфат ($Ca_3(PO_4)_2 \cdot xH_2O$), добриво з повільним вивільненням, біокераміка.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331656

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ ЗАБРУДНЕНИХ АВІАЦІЙНИМ ПАЛИВОМ

Лариса ЧЕРНЯК[1], Тетяна ДМИТРУХА[1], Дар'я ЗАБОЛОТНА[1],
Ольга ГРАМА[1], Ілона МИХАЛЬЧУК[1] ,
Томаш МАНЄЦКІ[2], Радослав ЧЕШЕЛЬСЬКІ[2]
[1]Державний університет «Київський авіаційний інститут»
проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна
[2]Лодзинський технічний університет
Stefana Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, Польща
e-mail: specially@ukr.net

Анотація

Проаналізовано перспективність використання мінеральних добрив при відновленні ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. Представлено результати експериментального дослідження впливу мінеральних добрив на процеси відновлення ґрунтів, забруднених авіаційним паливом марки ТС-1. Аналіз можливостей самоочищення ґрунту досліджувалась за зміною поліфенолоксидазної активності, як важливого ферментативного індикатора біохімічного стану ґрунту. Експериментальні дослідження виконано з використання штучно забруднених авіаційним паливом проб ґрунту (у різних концентраціях 10 орієнтовно допустимих концентрацій (ОДК) та 100 ОДК) та подальшим внесенням мінеральних добрив у різних співвідношеннях елементів N:P:K (20:20:20; 6:18:36; 13:40:13; 1,5:0,5:1). На основі отриманих експериментальних даних встановлено, що мінеральні добрива можуть бути ефективним засобом біостимуляції під час ремедіації ґрунтів, забруджених авіаційним паливом, а поліфенолоксидазна активність – інформативним показником оцінки ефективності такого впливу.

Ключові слова: *нафтопродукти, відновлення ґрунтів, техногенно навантажені території, екологічна безпека, авіаційні палива.*

У роботі представлено результати експериментального дослідження процесів відновлення ґрунтів, забруднених авіаційним паливом, шляхом застосування мінеральних добрив з різним співвідношенням елементів живлення (азот: фосфор: калій – N : P : K). Основна увага приділена аналізу змін поліфенолоксидазної активності ґрунту (ПФО) як одного з важливих біохімічних індикаторів його екологічного стану та здатності до самовідновлення. Дослідження має актуальне значення у контексті екологічної безпеки, оскільки забруднення авіаційним паливом належить до одного з найбільш токсичних видів антропогенного навантаження, здатного суттєво змінювати мікробіологічну та ензиматичну активність ґрунтів [1].

Експериментальні дослідження передбачали штучне забруднення досліджуваних проб ґрунту авіаційним паливом марки ТС-1, з подальшим внесенням мінеральних добрив у різних концентраціях і співвідношеннях N:P:K (20:20:20; 6:18:36; 13:40:13; 1,5:0,5:1). Контрольна проба ґрунту не зазнавала жодного впливу палива чи мінеральних добрив. Зміну поліфенолоксидазної активності ґрунту визначали за стандартною методикою ґрунту за стандартною методикою (ДСТУ 7928:2015 Якість ґрунту. Визначення активності ґрунтового ферменту поліфенолоксидази фотоелектроколориметричним методом) на початку дослідження, на десяту та на двадцяту добу дослідження. Результати дослідження представлені на рис.1.

Результати показали, що внесення мінеральних добрив сприяє помітному відновленню ферментативної активності у забруднених зразках ґрунту, штучно забруднених авіаційним паливом, порівняно з необробленим варіантом. Найбільшу стимулюючу дію на активність ПФО виявлено на десяту добу дослідження при співвідношенні N:P:K = 13:40:13, що свідчить про важливу роль фосфору у підтримці мікробіологічної активності під час ремедіації. Водночас надлишкове внесення азоту чи калію не забезпечувало такого ж ефекту (зокрема на двадцяту добу дослід), а в деяких випадках навіть гальмувало відновлення ферментативної активності. Така залежність, імовірно, зумовлена специфікою біохімічного обміну в умовах нафтового забруднення ґрунту.

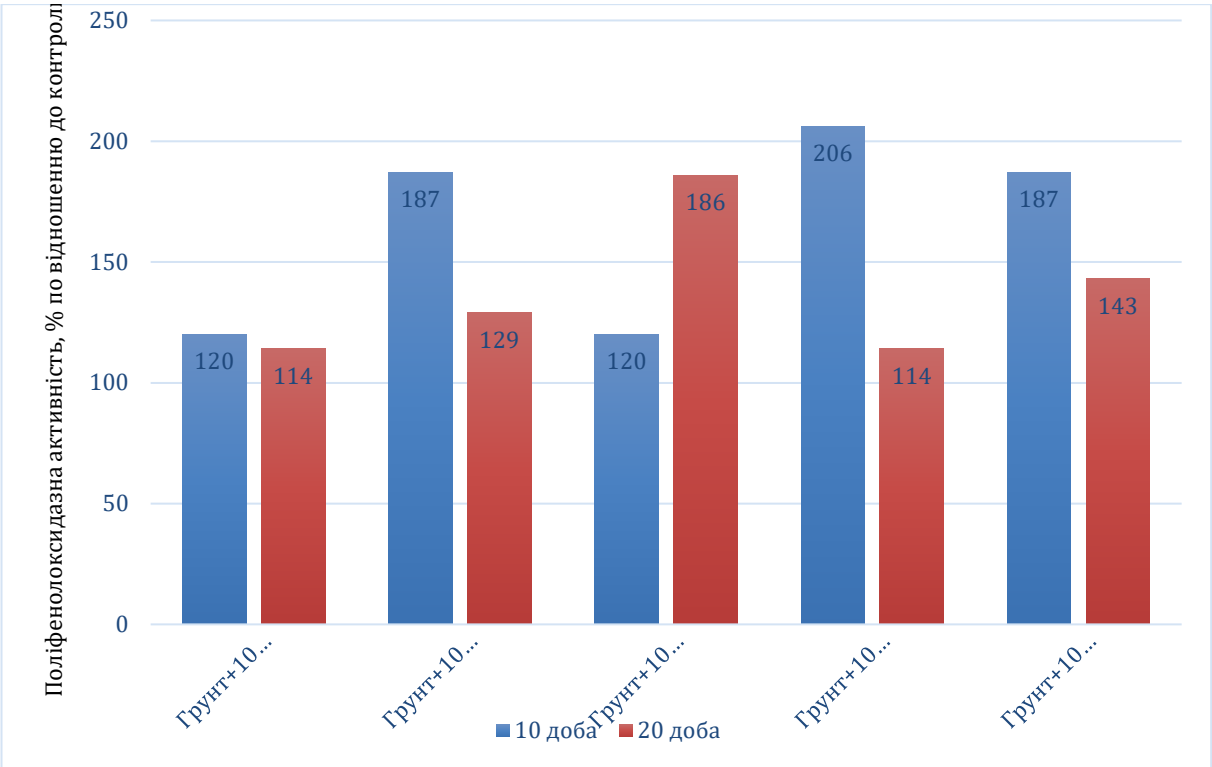


Рис. 1. *Залежність поліфенолоксидазної активності ґрунту (% по відношенню до контролю) від рівних співвідношень NPK та часу відновлення ґрунту*

У результаті аналізу експериментальних даних встановлено, що перші десять днів після забруднення характеризуються різким зростанням ферментативної активності, що вказує на активацію мікробних консорціумів, здатних до деградації вуглеводнів. Подальше відновлення

ферментативної активності спостерігалося лише для NPK 6:18:36 та для інших зразків спостерігалось зниженням активності ПФО залежало від типу внесених добрив, що свідчить про зростання токсичного впливу авіаційного пального на ґрунтову мікробіоту у період дослідження. Подальше відновлення ферментативної активності залежало від типу внесених добрив. Для проби ґрунту без додавання мінеральних спостерігалось незначне зниження ПФО на двадцяту добу дослідження. Натомість у зразках із внесенням добрив відзначено зростання ферментативної активності на десяту добу дослідження, що вказує на активацію мікробних консорціумів, здатних до деградації вуглеводнів та поступове зниження на двадцяту добу дослідження.

Висновки. Загалом результати дослідження підтверджують доцільність використання мінеральних добрив як одного з напрямів біостимуляції ґрунту при його відновленні після забруднення нафтопродуктами. Вибір оптимального співвідношення N:P:K має суттєве значення для ефективної ремедіації. Встановлена залежність активності ПФО до дії авіаційного палива за умов наявності мінеральних добрив у ґрунті свідчить про її інформативність як індикатора стану ґрунтової екосистеми. Проведене дослідження створює передумови для розробки адаптивних технологій біоремедіації, зокрема з урахуванням типу ґрунту, ступеня забруднення та доступності ресурсів для стимуляції мікробіологічних процесів.

Література

1. Lay J.-J., Huang Y.-T., Han C.-L., Zhong W.-Z. Functional microbiome and phytoremediation enhance soil diesel degradation via enzyme activity**.** *Journal of Environmental Management,* 2025, 373: 123604. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123604.

2. Wu Z., Kang L., Man Q. та ін. Synergistic surfactant cleaning-bioaugmentation strategy enables deep remediation of heavily petroleum-contaminated soils: field validation and microbial mechanism**.** *International Biodeterioration & Biodegradation,* 2025: 106079. DOI: 10.1016/j.ibiod.2025.106079.

INVESTIGATION OF SOIL REMEDIATION PROCESSES IN AREAS CONTAMINATED WITH JET FUEL

Larysa CHERNIAK
State University «Kyiv aviation institute»
Lubomyra Huzara Avenue, 1, Kyiv, 03058, Ukraine
http//orcid.org/ 0000-0003-4192-3955

Tetiana DMYTRUKHA
State University «Kyiv aviation institute»
Lubomyra Huzara Avenue, 1, Kyiv, 03058, Ukraine
http://orcid.org/0000-0001-5195-9519

Daria ZABOLOTNA
State University «Kyiv aviation institute»
Lubomyra Huzara Avenue, 1, Kyiv, 03058, Ukraine
http://orcid.org/0009-0000-9382-3329

Olga HRAMA
State University «Kyiv aviation institute»
Lubomyra Huzara Avenue, 1, Kyiv, 03058, Ukraine
http://orcid.org/0009-0000-38518647

Ilona MYKHALCHUK
State University «Kyiv aviation institute»
Lubomyra Huzara Avenue, 1, Kyiv, 03058, Ukraine
http://orcid.org/0009-0009-0020-0081

Tomasz MANIECKI
Lodz University of Technology (LTU)
Stefana Zeromskiego 114, 90-543 Lodz, Poland
https://orcid.org/0000-0002-7687-7250

Radoslaw CIESIELSKI
Lodz University of Technology (LTU)
Stefana Zeromskiego 114, 90-543 Lodz, Poland
https://orcid.org/0000-0002-0720-6875

Abstract: The authors analyzed the prospects of using mineral fertilizers for the remediation of soils contaminated with petroleum products. The paper presents the results of an experimental study on the effects of mineral fertilizers on the remediation processes of soils polluted with TS-1 jet fuel. The potential for natural soil self-purification was assessed by monitoring changes in polyphenol oxidase activity, a key enzymatic indicator of the soil's biochemical state. The experiments were conducted using artificially contaminated soil samples exposed to varying concentrations of jet fuel (10 and 100 approximate permissible concentrations, APC), followed by the application of mineral fertilizers with different N:P:K ratios (20:20:20; 6:18:36; 13:40:13; 1.5:0.5:1). Based on the experimental data, it was found that mineral fertilizers can serve as effective biostimulants in the remediation of jet fuel-contaminated soils, while polyphenol oxidase activity can be considered an informative indicator for assessing the effectiveness of such interventions.

Keywords: petroleum products, soil restoration, man-made territories, environmental safety, aviation fuels.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.328903

ВІДХОДИ ТОПІНАМБУРА У ВИГЛЯДІ СТЕБЕЛ ДЛЯ ВОЛОКНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

Романія ЧЕРЬОПКІНА, Віталій КИСЛИЙ, Кіріл НЕЛІДОВ, Максим НАУМЕНКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, м. Київ, 3703056, Україна
e-mail: chromi5@ukr.net

Анотація

Проведено делігніфікацію стебел топінамбура за витрат активного лугу 16 % в од. Na_2O від маси абс. сух сировини за температури 120 °С 15 хв, 30 хв та 45 хв з попереднім просочуванням продовж 30 хв. Показано отримання волокнистих напівфабрикатів підвищеного виходу із стебел топінамбура лужним способом придатних для виробництва картону у композиції з іншими ВНФ.

***Ключові слова**: топінамбур, січка, натронне варіння, делігніфікація.*

Пошук джерел сировини для отримання волокнистих напівфабрикатів є нагальною проблемою для підприємств целюлозно-паперового виробництва. У першу чергу це пов'язано із недостатньою кількістю деревної сировини, яка вважається основною для виробництва картонно-паперової продукції. Але нині успішно використовуються волокна, отримані із недеревних видів для забезпечення необхідних властивостей пакувальних матеріалів, гігієнічних та санітарних товарів, таких як паперові рушники, туалетний папір та одноразові серветки [1]

Особливістю недеревних видів є те, що вони відрізняються як від деревини хімічним складом і морфологічною будовою, а також між собою та навіть між різними частинами однієї рослини (наприклад, стебло, листя, вузли) [2]. Для недеревних видів, які містять достатньо целюлози, характерно вищий вміст геміцелюлози, золи, екстрактивних речовин, особливо кремнієвих сполук у порівнянні з деревиною [2, 3]. До особливостей фізичної характеристики такої сировини відносять низьку насипну щільність, високий вміст різних типів волокон та у більшості коротку довжину волокон [3].

Необхідно зауважити, що нині технологами достатньо вивчено та розроблено різних хімічних методів делігніфікації, які придатні для перероблення будь-яких видів рослинної сировини та з яких потенційно можна отримувати якісні волокнисті напівфабрикати [2].

Основними перевагами щодо використання того чи іншого виду недеревної сировини вважається стабільність джерела сировини та перспективністю його використання. До таких можна віднести добре вивчені відходи зернових та олійних культур, стебла кукурудзи, тростина, які мають потенціал для заміни деревної целюлози, оскільки вони вважаються доступними джерелами целюлозного волокна. Ця сировина структурно схожа на інші

рослинні волокна, що використовуються у виробництві паперу або картону, з погляду складу, фізичних та хімічних характеристик.

Зосередження людей на ефективності свого здоров'я призводить до більшої потреби у природніх продуктах харчування, до яких відноситься топінамбур або «земляна груша». Бульби топінамбура давно відомі своїми корисними властивостями і їх промислово вирощують для отримання з них цінних компонентів, наприклад, інуліну. Відповідно відходами топінамбура є наземна частина у вигляді стебел, які часто не мають застосування [4].

Топінамбур росте кущем із кількох стебел. Стебло – округлої форми, напівдерев'янисте, висотою 2 – 4 м, всередині заповнено губчатою паренхімою [5]. Особливістю топінамбура є те, що на одному місці його можна вирощувати протягом 5 – 8 років. Він дає багатий урожай надземної маси та бульбоплодів. Треба відмітити, що стебло топінамбура, в основному, розглядають як цінне біопаливо другого покоління (в основному етанолу і біогазу, а також бутанолу і біоводню) оскільки з гектара можна зібрати 3 – 7 т сухої маси за вологості 20 % або 36 – 49 т/г зеленої маси [5, 6]. Однак вивченню можливості використання стебел топінамбура для отримання різних видів волокнистих напівфабрикатів приділяється ще не достатньо уваги. Тому метою даної роботи було отримання волокнистих напівфабрикатів лужним способом із стебел топінамбура, які є відходами.

Для перероблення стебел обрано натронний спосіб. У целюлозно-паперовій промисловості натронний процес є одним із найбільш поширених для отримання целюлози з використанням хімікатів із сільськогосподарських волокнистих відходів, що обумовлено не тільки екологічністю процесу. Із-за високого вмісту кремнієвих сполук у волокнах, процес отримання якісної целюлози утруднюється, що є однією із основних проблем під час перероблення більшості відходів сільського господарства. Розчинення цих компонентів можливе лише у лужному середовищі [2].

Вибір режиму проведення делігніфікації базується на описаних у літературі дослідженнях, згідно яких показано, що за підвищеного тиску тривалість перероблення відходів натронним способом складає до 20 хв, що суттєво знижує затрати на отримання ВНФ [1].Як сировину використовували стебла топінамбура, які були заготовлені восени у Київській обл. і досягали 2-х метрів. Для варіння їх подрібнювали до січки розміром 3 – 4 см. Зовнішній вигляд стебел топінамбура і січки з нього показано на рис. 1.

а) б)

Рисунок 1. *Зовнішній вигляд стебел топінамбура (а) і січки з нього (б)*

Делігніфікацію січки проводили натронним щолоком за витрат активного лугу 16 % в од. Na_2O від маси абс. сух сировини в лабораторних стальних автоклавах, які опускали у наперед нагріту гліцеринову баню до 80 °С. Далі проводили підйом температури від 80 °С до 120 °С впродовж 30 хв. За кінцевої температури, варіння січки продовжували ще 15 хв, 30 хв та 45 хв. Температурний режим варіння наведено на рис. 2.

Після закінчення визначеного часу напівфабрикати вивантажували на сито для промивання від відпрацьованого розчину. Після варіння отримані ВНФ не розділялися на окремі волокна під тиском води, крім паренхіми (внутрішньої частини стебла). Здерев'яніла частина стебла після варіння зберігала форму січки, тому її піддавали механічному розділенню на окремі волокна (рис. 3 а), б), в)).

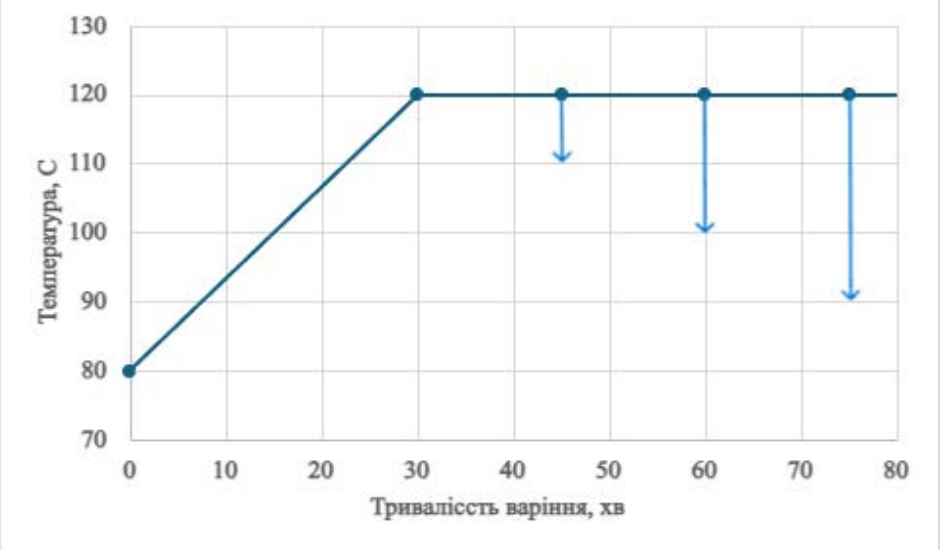


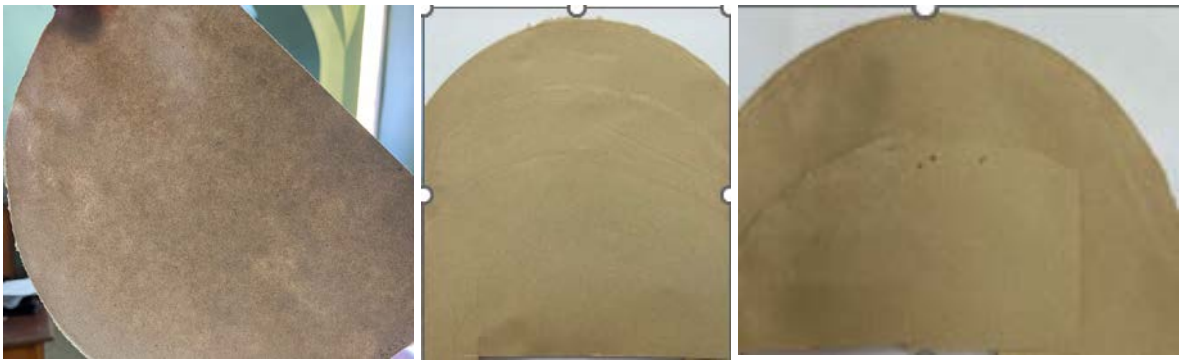
Рисунок 2. *Температурний графік варіння січки топінамбу*ра

а) б) в)

Рисунок 3. *Отримані волокнисті напівфабрикати після промивання і віджимання топінамбура: а) 15 хвилин; б) 30 хвилин; в) 45 хвилин*

В отриманих ВНФ визначали коефіцієнт сухості, який використовували для розрахунку виходу, масову частку лігніну згідно стандартних методик [2]. Для визначення фізико-механічних показників, отримані ВНФ розмелювали до досягнення ступеня млива 60 °ШР, виготовляли відливки масою 75 г/м^2 на ЛА-1 (рис. 4).

Для отримання співставних значень відливки витримували у поліетиленових файлах, а потім піддавали їх випробуванням опору роздиранню, міцності на злом під час багаторазових перегинів та розривному зусиллю згідно стандартних методик [2]. Результати досліджень якості отриманих ВНФ наведено у табл. 1.



а) б) в)

Рисунок 4. *Зовнішній вигляд зразків відливок волокнистих напівфабрикатів, отриманих із стебел топінамбура за тривалості варіння: а) 15 хв; б) 30 хв; в) 45 хв*

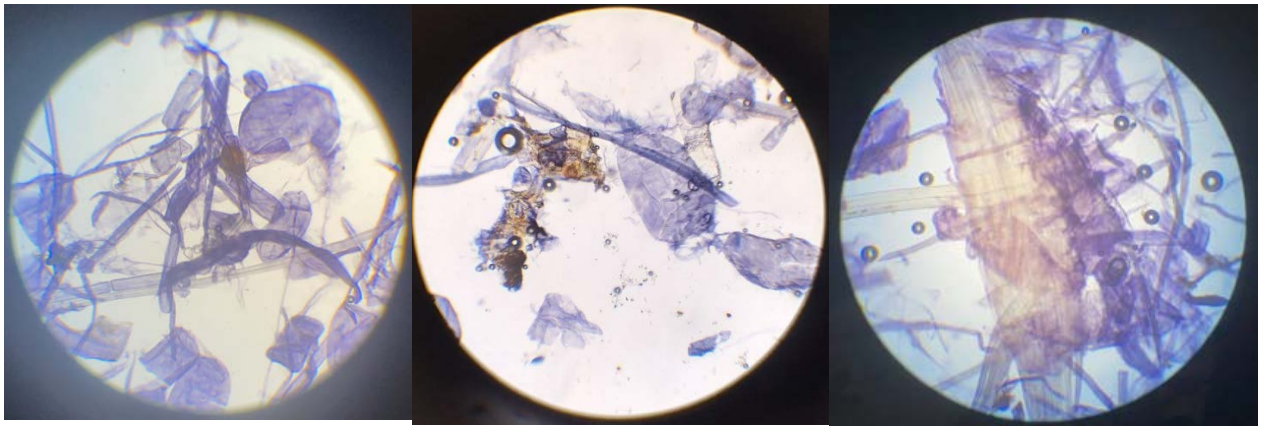
Таблиця 1. Показники якості волокнистих напівфабрикатів, отриманих із стебла топінамбура.

Умови варіння	Вихід, %	Масова частка лігніну, %	Фізико-механічні показники		
			Розривна довжина, м	Опір роздиранню, мН	Міцність на злом під час багаторазових перегинів, к.п.п.
15 хв + АХ 0,1 % (антрахінону)	42,3	7,5	4250	333	9
30 хв	55,7	10,4	4440	275	5
45 хв	51,8	6,3	4510	392	11

Як видно із даних табл. 1, із стебел топінамбура отримано волокнисті напівфабрикати підвищеного виходу. Додавання антрахінону під час варіння січки навіть за нетривалого варіння дозволяє отримувати напівфабрикат співставний за ступенем делігніфікації і показниками міцності з тим, який отримано за подовженої тривалості. Показники міцності отриманих напівфабрикатів достатньо високі за виключенням показника міцності на злом під час багаторазових перегинів та повністю узгоджуються з літературними даними для недеревної сировини.

Для кожного варіанту (різної тривалості варіння) для ВНФ зроблено мікрофотографії з використанням світлового мікроскопа, які показано на рис. 5.

Як видно із фото (рис. 5), ВНФ містять луб'яні волокна різного розміру, які є найбільш цінними. Також після варіння 15 хв спостерігається значна частина паренхімних клітин та сітчастих судин, які притаманні у більшій мірі серцевині, однак, зі збільшенням тривалості варіння їх кількість зменшується, що пояснюється частковим їх переварюванням і втратою під час промивання. Треба відмітити наявність деяких лігніфікованих волокон і лігніну у масі, що частково пояснює менші показники міцності отриманих ВНФ.



15 хв 30 хв 45 хв

Рисунок 5. *Мікрофотографії зразків невибілених волокнистих напівфабрикатів із стебел топінамбура отриманих за витрат активного лугу 16 % в од. Na_2O за тривалості варіння 15, 30 та 45 хв (не розмелених, світловий мікроскоп зб. 8Х10)*

Висновок

У результаті дослідження показано, що стебла топінамбура за нетривалого варіння від 15 до 45 хв і низької температури 120 °С доречно переробляти з отриманням волокнистих напівфабрикатів підвищеного виходу із задовільними показниками міцності, придатних для виробництва картону у композиції з іншими ВНФ.

Література

1. Limenew Abate Worku, Archana Bachheti, Rakesh Kumar Bachheti, Cristiano E. Rodrigues Reis. Anuj Kumar Chandel. Agricultural Residues as Raw Materials for Pulp and Paper Production: *Overview and Applications on Membrane Fabrication*. https://www.mdpi.com/2077-0375/13/2/228

2. Технологія недеревних волокнистих напівфабрикатів: підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», освітньо-професійної програми «Промислова екологія та ресурсоефективні чисті технології» / Р.І. Черьопкіна, І.В. Трембус, І.М. Дейкун В.А., Барбаш В.А.; – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 229 с.

3. Abd El-Sayed, E.S.; El-Sakhawy, M.; El-Sakhawy, M.A.-M. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nord. Pulp Pap. Res. J.* **2020**, *35*, 215 – 230. https://www.researchgate.net/publication/339097245_Nonwood_fibers_as_raw_material_for_pulp_and_paper_industry

4. Пую В.Л. Господарська продуктивність рослин топінамбура сортів подільський 94 і львівський. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Сільськогосподарські науки.* Випуск 26. – 2017. – С. 124 – 135. https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/252027

5. Топінамбур: вирощування та користь. https://soncesad.com/statti/ovochi/kartoplya/topinambur-viroshhuvannya-ta-korist.html

6. R. Travaini, J. Martín-Juárez, A. Lorenzo Hernando, S. Bolado-Rodríguez, Bioresource Potential of Jerusalem Artichoke Stem for Cellulose Production Eurasian Chemico-Technological Journal 21 (2019) 173-182 *Technol.* 199 (2016) 2–12. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26409859/

JERUSALEM ARTICHOKE WASTE IN THE FORM OF STALKS FOR FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS

Romaniia CHEROPKINA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteiskyi ave., 37, 3703056, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9022-1576

Vitalii KISLY
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteiskyi ave., 37, 3703056, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0009-0003-1714-6655

Kirill NELIDOV
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteiskyi ave., 37, 3703056, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-0135-6338

Maxim NAUMENKO
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteiskyi ave., 37, 3703056, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0009-0004-1975-9479

Abstract

The delignification of Jerusalem artichoke stems was carried out at an active alkali consumption of 16% in units of Na_2O from the mass of abs. dry raw materials at a temperature of 120 °C for 15 min, 30 min and 45 min with preliminary soaking for 30 min. The production of fibrous semi-finished products with increased yield from Jerusalem artichoke stems by an alkaline method suitable for the production of cardboard in a composition with other VNFs was shown.

Key words: jerusalem artichoke, chopping, soda cooking, delignification.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331724

APPLICATION OF RED SLUDGE AS AN ALTERNATIVE COAGULANT FOR WATER PURIFICATION AND RESTORATION OF DEGRADED SOILS

Yuliia CHESTNYKH, Olena KOSOBUTSKA, Ganna TROKHYMENKO
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolaiv, 54007, Ukraine
e-mail: yuliia.chestnykh@gmail.com

Abstract

The possibility of using red sludge in water purification and soil remediation technologies was investigated. The effectiveness of the use of coagulants synthesized from red sludge to remove water turbidity was evaluated. The results confirm the feasibility of using red mud in water treatment processes.

Key words: *red sludge, synthesized coagulants, water treatment, soil remediation, reducing soil acidity.*

Water pollution and soil degradation are among the most pressing challenges of our time. One of the most common methods of water treatment is coagulation, but traditional coagulants such as aluminum or iron sulfate are characterized by high costs and the associated generation of secondary hazardous waste. In this context, there is growing interest in using alternative materials, including industrial waste, as a source of reagents.

One such material is red mud, a by-product of alumina production rich in Fe and Al oxides. It is known that red sludge-based activated coagulants can effectively clarify water, competing with traditional reagents [1]. The effectiveness of sludge-based composites for phosphate removal to a concentration of <0.02 mg/L has been confirmed [2]. Other studies have shown the effectiveness of using red sludge to treat wastewater with a high arsenic content generated in the metallurgical industry. The results showed that almost 100% of arsenic was gradually removed [3].

Another promising area in the use of red sludge is the development of new composite materials for water treatment [4]. This approach involves the combination of industrial waste, such as red sludge, with functional polymer structures, which allows for both adsorption and oxidation mechanisms. This creates opportunities for the development of environmentally friendly and efficient water treatment solutions.

In addition to water purification, alumina by-products have a high potential for use in the restoration of degraded soils Studies have shown that adding red sludge to soils can improve their structure, increase nutrient content, and help restore biological activity [5]. Sludge should only be used after preliminary treatment. In its original form, sludge is hazardous to the environment, so direct application to soil without neutralisation is prohibited. Methods of neutralising sludge before use:

carbonation - treatment with CO_2 to lower the pH; mixing with biocompost or peat - reduces toxicity; use in the form of hydrogel or granules - dosage control.

Stabilisation with phosphates - reduces the mobility of heavy metals. Potential benefits after treatment:

1. Improvement of soil structure - sludge can act as a structure-building agent after treatment.
2. Reducing soil acidity - due to its high pH, it can neutralise acidic soils in small doses.
3. Enrichment of soils with microelements - especially iron, calcium, magnesium.

A study was conducted on rice fields with sodium saline soils in the Sunnen Plain in North-East China. The results show that the combined application of aluminium sulphate at a dose of 500 kg/m^2 with an inorganic fertiliser is an effective means of improving sodium saline soils in the Sunnen Plain, Northeast China. Based on the results, the pH, EC, ESP, total alkalinity, SAR, Na^+, and HCO_3 were significantly reduced in the sodium saline soil, while CEC, SOC, available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), K^+ were significantly increased compared to the other fertilizer [6].

This opens up new opportunities for sustainable land management and reducing the negative impact of industrial waste on the environment.

Studies were conducted to determine the effectiveness of water turbidity removal by coagulants SCM_1 and SCM_2 synthesized from red sludge in comparison with the widely used aluminum sulfate (Fig. 1).

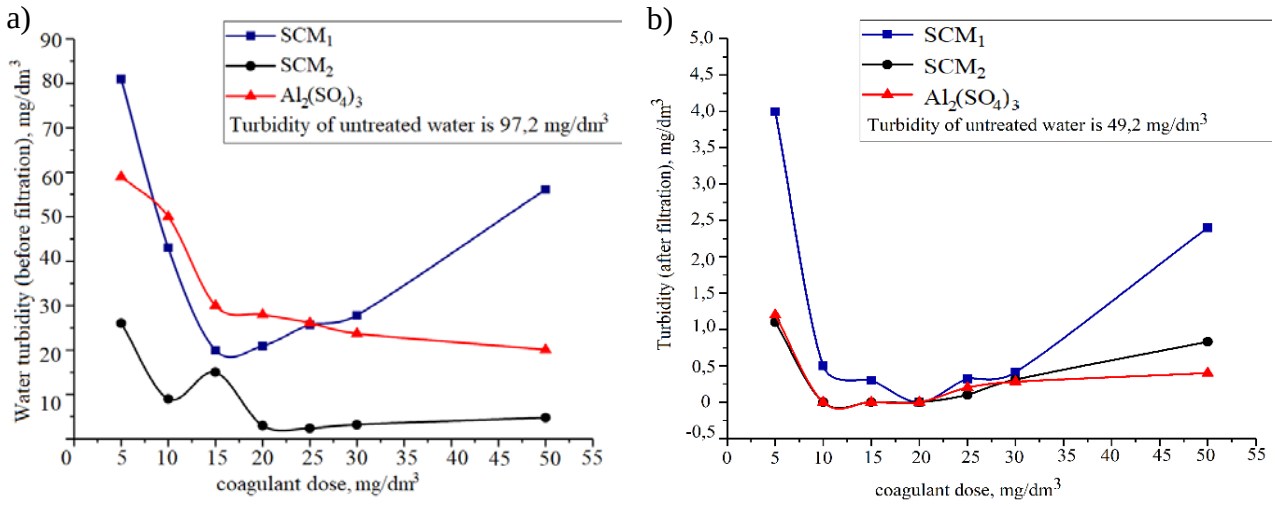


***Fig. 1** Turbidity removal before (a) and after (b) filtration by SCM_1, SCM_2 and $Al_2(SO_4)_3$ coagulants accordingly*

According to the results, SCM_2 is more effective in removing turbidity before filtration. After filtration, all coagulants reduced turbidity to drinking water levels. However, an increase in turbidity was observed at concentrations of 25 mg/dm^3 and above. Thus, the synthesized coagulants SCM_1 and SCM_2 demonstrated high coagulation properties in water treatment at low doses. These coagulants can become an alternative to commercial aluminum sulfate, since they will have a lower cost and will not be inferior in terms of application efficiency.

References

1. Kyrii, S., Dontsova, T., Kosogina, I., Astrelin, I., Klymenko, N., & Nechyporuk, D. (2020). Local wastewater treatment by effective coagulants based on wastes. *Journal of Ecological Engineering*, *21*(5), 34–41. https://doi.org/10.12911/22998993/122184

2. Somogyi, V., Pitás, V., Berta, K. M., & Kurdi, R. (2022). Red Mud as Adsorbent to Recover Phosphorous from Wastewater Streams. Sustainability, 14(20), 13202. https://doi.org/10.3390/su142013202

3. Lu, Z., Qi, X., Zhu, X., Li, X., Li, K., & Wang, H. (2021). Highly effective remediation of high-arsenic wastewater using red mud through formation of $AlAsO_4$@silicate precipitate. Environmental pollution (Barking, Essex: 1987), 287, 117484. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117484

4. Sandu, T., Olaru, E. A., Mitran, R.-A., Miron, A., Dolana, S.-V., Zaharia, A., Gavrilă, A.-M., Dumitru, M.-V., Chiriac, A.-L., Sârbu, A., & Iordache, T.-V. (2024). Composite Copolymer Beads Incorporating Red Mud for Water Amendment by Adsorption—Oxidation Processes. Applied Sciences, 14(14), 6386. https://doi.org/10.3390/app14146386

5. Sulakhudin, S., Herawatiningsih, R., Krisnohadi, A., Abdillah, A. M., Santi, S., & Mudim, M. (2024). Impact of red mud on soil properties and revegetation species growth in bauxite mining land reclamation. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, *12*(1), 6509–6518. https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.121.6509

6. Zhou, M., Liu, X., Meng, Q. *et al*. Additional application of aluminum sulfate with different fertilizers ameliorates saline-sodic soil of Songnen Plain in Northeast China. *Journal Soils Sediments* 19, 3521–3533 (2019). https://doi.org/10.1007/s11368-019-02311-9

ЗАСТОСУВАННЯ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО КОАГУЛЯНТУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ҐРУНТІВ

Юлія ЧЕСТНИХ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України 9, м. Миколаїв, 54007, Україна
https://orcid.org/0009-0006-6732-6592

Олена КОСОБУЦЬКА
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України 9, м. Миколаїв, 54007, Україна
https://orcid.org/0009-0008-8489-4203

Ганна ТРОХИМЕНКО
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України 9, м. Миколаїв, 54007, Україна
https://orcid.org/0000-0002-0835-3551

Анотація

Досліджено можливість застосування червоного шламу у технологіях очистки води та відновленні ґрунтів. Проведено оцінку ефективності застосування синтезованих з червоного шламу коагулянтів для видалення каламутності води. Результати підтверджують доцільність використання червоного шламу у процесах очищення води.

Ключові слова: червоний шлам, синтезовані коагулянти, очищення води, відновлення ґрунтів, зменшення кислотності ґрунтів.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331379

РЕГЕНЕРАЦІЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МЕМБРАН ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

Ольга ШЛІХТЕР, Артур КОСОГІН, Ірина КОСОГІНА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський 37,корп.4, 03056, м. Київ, Україна
e-mail: shlikhter.olga@lll.kpi.ua

Анотація

Воєнні дії серйозно впливають на стан водних ресурсів України через пошкодження нафтосховищ, складів паливно-мастильних матеріалів та знищення інфраструктури підприємств і очисних споруд, що призводить до значного забруднення водних об'єктів. Забезпечення населення якісною питною водою за даних умов (локально) можливе із застосуванням мембранних технологій. В результаті експлуатації комерційних та побутових мембранних систем на поверхні зворотноосмотичних мембран утворюються відкладення (фоулінг), через що знижується продуктивність системи, а мембрани потребують заміни на нові. На даний момент відпрацьовані комерційні та побутові мембрани зворотного осмосу практично не утилізуються. В роботі запропоновано здійснювати регенерацію відпрацьованих мембран у три стадії з наступним використанням регенерованих мембран у технології очищення стічних вод з пониженням рейтингу зворотноосмотичних мембран до нанофільтраційних або ультрафільтраційних.

Ключові слова: *якість води, очищення води, мембрани, зворотний осмос, фоулінг, окисник, регенерація.*

Рівень забруднення поверхневих та підземних вод зростає з кожним роком, виною тому є пошкодження критичної інфраструктури внаслідок воєнних дій, антропогенний вплив на водні ресурси, а також скид у відкриті водойми недостатньо очищених стічних вод. Муніципальні та промислові відходи, хімічні добрива, гербіциди та пестициди, які не були належним чином утилізовані, потрапляють у ґрунт, просочуються в деякі водоносні горизонти і погіршують якість ґрунтових вод [1, 2].

Наразі існуючі традиційні системи водопідготовки не здатні ефективно очистити воду через значне погіршення її якості. Мембранні технології із застосування зворотноосмотичних (ЗО) мембран є ефективним рішенням, яке може забезпечити гарантовану якість води.

Метою роботи є встановлення закономірностей регенерації відпрацьованих побутових та комерційних зворотноосмотичних мембран з пониженням рейтингу фільтрації для їх повторного використання в технології очищення стічних вод. Встановлення параметрів регенерації відпрацьованих елементів дозволить отримувати мембрани із заданими характеристиками, які зможуть бути використані на рівні з новими. Повторне використання регенерованих елементів буде сприяти зменшенню кількості відходів та концепції циркулярної економіки у водопідготовці.

Мембранні процеси широко використовуються як в різних технологічних процесах, так і в галузі охорони навколишнього середовища для очищення, розділення і концентрування водних розчинів. Також мембранні процеси використовуються для створення комбінованих технологічних схем очищення стічних вод і для організації замкнутих водооборотних систем. До основних мембранних методів поділу рідких систем відносяться ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос.

За продуктивністю мембранних технологій вирізняють: промислові, комерційні та побутові системи. Основною проблемою експлуатації мембранних систем є їх чутливість до якості води, яка подається на очищення та утворення на поверхні мембранних елементів відкладень (фоулінгу) різного типу. Розрізняють органічний фоулінг, колоїдний фоулінг, біофоулінг та неорганічний фоулінг (скейлінг). Органічний фоулінг формується на поверхні мембрани через осадження органічних речовин у примембранному шарі, наприклад гумінових речовин, які надають воді високої кольоровості. Колоїдний фоулінг формується на поверхні мембран через наявність у воді сполук заліза, мангану та силікатів, які при взаємодії з розчиненим у воді киснем утворюють малорозчинні сполуки, наприклад гідроксид заліза. Біофоулінг – це закріплення на поверхні мембран мікроорганізмів (бактерії, віруси), які присутні у воді, а відкладення неорганічних речовин (склейлінг) виникає у разі локального пересичення в примембранному шарі карбонатів та сульфатів кальцію та інших сполук (рисунок 1).

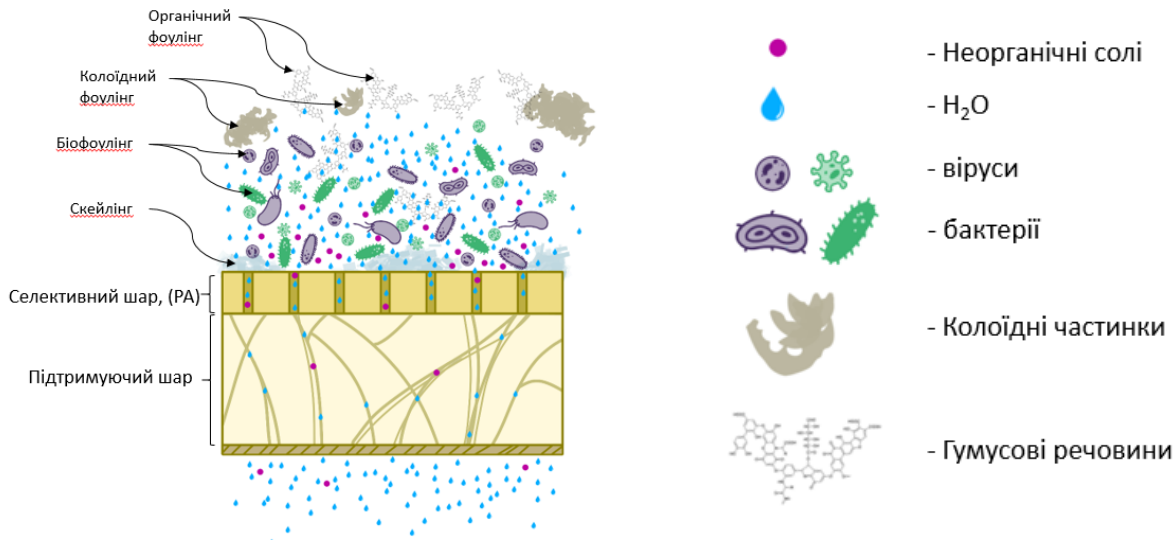


Рисунок 1. *Схематичне зображення відпрацьованої зворотноосмотичної мембрани*

Як результат, в системах очищення спостерігається спочатку падіння продуктивності та збільшення перепаду тиску на мембранах. В промислових системах для запобігання утворенню різних типів фоулінгу на поверхі мембран використовують спеціальні реагенти антискаланти та біоциди або здійснюють регенерацію мембран. Промислові ЗО мембранні елементи піддаються регенерації за визначеною схемою і строк експлуатації може сягати до 6 років.

Традиційно прийнято для промислових систем використовувати регенерацію у два етапи: спочатку проводять лужну обробку із використанням спеціальних розчинів на основі NaOH, під час якої з поверхні мембрани видаляється органічний та колоїдний фоулінг. На другій

стадії регенерації зазвичай проводять кислотну обробку мембран спеціальними розчинами на основі лимонної або хлоридної кислоти, під час якої з поверхні мембран видаляється скейлінг.

В той же час, в комерційних та побутових установках можливість запобігти утворенню фоулінгу відсутня, тому строк служби мембран зворотного осмосу суттєво нижчій – лише один рік, по завершенню якого відпрацьовані мембрани складуються. За даними Global Water Intelligence (GWI-2024) [3], щорічно накопичуються 380 тис. штук на рік відпрацьованих комерційних мембранних елементів, які активно використовувалися споживачами, з яких 1900 т/рік елементів просто викидаються та не утилізуються належним чином.

З метою збільшення строку служби елементів, запропоновано метод переробки мембранних елементів комерційного та побутового ряду шляхом їх регенерації [4,5]. В роботі для лужної регенерації використано товарний продукт Ecoclean 211 (виробник Ecosoft, Україна), а для кислотної регенерації – Ecoclean 203 (виробник Ecosoft, Україна). Також необхідно врахувати, що для таких систем традиційна двостадійна регенерація не є ефективною, бо на поверхні мембран формується біофоулінг, видалення якого потребує використання сильних окисників.

Такими окисниками можуть бути пероксид водню (H2O2), перманганат калію (KMnO4), озон (O3) та хлорвмісні реагенти, наприклад NaClO [6]. Недоліком застосування H2O2 є необхідність в значній тривалості обробки мембранного елемента з метою очищення поверхні матеріалу; недоліком використання KMnO4 як окисника є складність контролю за ступенем окиснення мембранного елементу в процесі регенерації, адже у випадку перевищення необхідної тривалості розпочинається процес руйнування самого полотна мембрана. Іншим недоліком перманганату калію як окисника є токсичність даного реагенту. Недоліком використання озону для видалення забруднень з поверхні мембрани є потреба в постійному контролі його концентрації для її підтримання на одному рівні, що пов'язано із низькою розчинністю озону.

Попередніми дослідженнями [7] виявлено достатньо високу ефективність застосування розчину NaClO для регенерації мембранного полотна. При дозі натрію гіпохлориту 10 000 мг/дм3 за тривалості обробки 24 години та підтримання pH середовища в діапазоні від 10 до 12, досягнуто відновлення поверхні мембрани до 72 % в порівнянні з новою, що вказує на доцільність повторного використання мембран.

Однак через високу окисну здатність гіпохлориту взаємодія окисника відбувається не лише із відкладеннями, а й з полотном мембрани, що призводить до часткового руйнування селективного шару мембрани [8]. Встановлено, що після окисної обробки розчином NaClO зростає проникність полотна мембрани та падає селективність мембрани, як результат, регенеровані мембрани повторно можуть бути використані в технології очищення стічних вод з пониженням рейтингу, тобто як нанофільтраційні або ультрафільтраційні мембрани в залежності від ступеня руйнування полотна мембрани.

Розраховано, що орієнтована вартість регенерації одного відпрацьованого комерційного мембранного елемента за запропонованою 3-стадійною схемою не буде перевищувати 1200 грн, що при початковій вартості нового елементу в середньому 6300 грн вказує на безперечну доцільність здійснення регенерації відпрацьованих елементів.

В подальшому планується проведення комплексу досліджень із встановлення необхідної дози окисника та умов проведення для контрольованої (із заданим ступенем відновлення) регенерації відпрацьованих комерційних та побутових мембран. Крім того, планується провести пілотні дослідження щодо встановлення реального строку експлуатації відновлених мембранних елементів.

Роботу виконано в рамках проєкту прикладних наукових досліджень «Хімічно модифіковані мембрани для оперативного виявлення у природних водах нітрогенвмісних сполук як маркерів вибухових речовин» за рахунок коштів Державного бюджету України (Державний реєстраційний номер 0124U001095).

Література

1. What Causes Tap Water Contamination. Drinking Water. URL: https://www.cdc.gov/drinking-water/causes/?CDC_AAref_Val=https://www.cdc.gov/healthywater/drinking/contamination.html (date of access: 04.06.2025).

2.Quality of Ground Water. U.S. Geological Survey Publications Warehouse. URL: https://pubs.usgs.gov/gip/gw/quality.html#:~:text=Ground%20water%20may%20contain%20dissolved,chloride,%20bicarbonate,%20and%20sulfate (date of access: 04.06.2025).

3. GWI. GWI. URL: https://www.globalwaterintel.com/documents/tariff-survey-2024 (date of access: 04.06.2025).

4. Modification of used commercial reverse osmosis membranes to nanofiltration modules for the production of mineral-rich packaged drinking water / B. Govardhan et al. Applied Water Science. 2020. Vol. 10, no. 11. URL: https://doi.org/10.1007/s13201-020-01312-1 (date of access: 04.06.2025).

5. Extending the life of water reuse reverse osmosis membranes using chlorination / B. M. Souza-Chaves et al. Journal of Membrane Science. 2021. P. 119897. URL: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119897 (date of access: 04.06.2025).

6. Oh J. H., Jang A. Application of chlorine dioxide (ClO 2) to reverse osmosis (RO) membrane for seawater desalination. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2016. Vol. 68. P. 281–288. URL: https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.09.006 (date of access: 04.06.2025).

7. Production of physiologically complete drinking water using modified reverse osmosis membrane elements / A. Tyvonenko et al. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 2, no. 10 (122). P. 6–13. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277491 (date of access: 04.06.2025).

8. Study on hypochlorite degradation of aromatic polyamide reverse osmosis membrane / G.-D. Kang et al. Journal of Membrane Science. 2007. Vol. 300, no. 1-2. P. 165–171. URL: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.05.025 (date of access: 04.06.2025).

REGENERATION OF USED REVERSE OSMOSIS MEMBRANES

Olga SHLIKHTER
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteisky Ave., Building 4, 03056, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0009-0004-5193-3756

Artur KOSOHIN
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteisky Ave., Building 4, 03056, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0009-0003-3087-709X

Iryna ĸOSOGINA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteisky Ave., Building 4, 03056, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-9795-7110

Annotation

Military operations seriously affect the state of Ukraine's water resources due to the damage to oil storage facilities, fuel and lubricant warehouses and the destruction of the infrastructure of enterprises and water treatment facilities, which leads to significant pollution of water bodies. Providing the population with high-quality drinking water under these conditions (locally) is possible with the use of membrane technologies. As a result of the operation of commercial and domestic membrane systems, deposits (fouling) form on the surface of reverse osmosis membranes, which reduces the system's productivity, and the membranes need to be replaced with new ones. At the moment, used commercial and domestic reverse osmosis membranes are practically not recycled. This work proposes to regenerate used membranes in three stages with the subsequent use of regenerated membranes in wastewater treatment technology with a decrease in the rating of reverse osmosis membranes to nanofiltration or ultrafiltration.

Keywords: water quality, water purification, membranes, reverse osmosis, fouling, oxidant, regeneration.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331595

FEAUTERES OF THE GROUNDWATERS CHEMICAL COMPOSITION ON THE NATIONAL CONSERVATION AREA "ST. SOPHIA OF KYIV" TERRITORY

Kostiantyn YAROSHENKO[1], Iryna KOLIABINA[1], Volodymyr SAPRYKIN[2,3], Nadiia MOLOCHKOVA[3], Ehorii DRAMARETSKYI[4,1]

[1]*Institute of Geological Sciences of National Academy of Sciences of Ukraine*
55b Olesia Honchara str., Kyiv, 01054, Ukraine
[2]*State Institution "Radioenvironmental Centre of National Academy of Sciences of Ukraine"*
55b Olesia Honchara str., Kyiv, 01054, Ukraine
[3]*National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv"*
24 Volodymyrska str., Kyiv, 01001, Ukraine
[4] *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine*
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: yark.nasu@gmail.com

Abstract

The article analyses the monitoring data of the groundwater chemical composition in nine observation wells on the territory of the St. Sophia Cathedral ensemble, obtained during 2012-2024. The results of the groundwaters chemical composition analysis of the Reserve's territory revealed exceedances of the standard indicators (total mineralization, chlorides, ammonium, sodium and potassium, pH) in the waters of a number of wells. It was found that the water from the wells located in the northern and western parts of the Reserve's territory has either a weakly expressed trend towards an increase in the concentration of groundwater chemical composition components and total mineralization, or no such trend at all, while the water from the wells located in the eastern, southern and central parts of the Reserve's territory has a significant trend towards an increase in the concentration of both individual components and total mineralization. The facts of exceeding the established standards in the waters of a number of wells in the Reserve by various indicators may have natural and technogenic causes, while the trends towards a constant, significant increase in a number of water components and overall mineralization have technogenic causes. It was determined that the groundwater of the reserve territory is divided into two groups by its composition: mixed type (with a slight predominance of hydrocarbonate ions) and calcium chloride.

Key words: *groundwaters, chemical composition, monitoring, National Conservation Area «St. Sophia of Kyiv», mineralization.*

Introduction. In accordance with the monument protection requirements of Ukraine and UNESCO's requirements for the protection of the world's cultural and natural heritage, the National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv" carries out ongoing comprehensive monitoring of the technical conditions of the monuments and the surrounding area of the Sophia Cathedral. A necessary

component of such monitoring is hydrogeological monitoring, including analysis of the chemical composition of groundwater, its level and temperature.

The aim of the work was to determine the mechanisms and technogenic impact on the formation of the chemical composition of groundwater in the territory of the National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv".

Methods. ***Sampling*** was carried out using a funnel after complete manual pumping of the wells. Sampling was carried out from nine observation wells - No. 5', 6, 7', 9', 10, 11, 12, 13, 14 - located on the territory of the National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv" in the summer-autumn (late August - early September) and autumn-winter (late November - early December) periods. The chemical composition of the water samples was determined in the hydrochemical laboratory. The work was carried out at the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine in accordance with the agreement with the National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv" [1]. Historical data on the chemical composition of water for previous years were used from the references [2, 3].

Fig. 1. *General plan of the National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv" with hydrogeological monitoring wells [2]*

Potentiometric method for determination of the pH and the concentration of Ca^{2+}, Cl^-, NO_3^-, NH_4^+ ions of water samples by the using a DL AI-125 ionometer and a set of glass and ion-selective electrodes. By ***flame spectrometry*** was determined the concentration of Na^+ and K^+ cations using an Elico CL 22D flame photometer. By the ***titrimetric method*** with phenolphthalein and methylorange indicators the concentrations of CO_3^{2-} and HCO_3^- anions were determined respectively. The ***gravimetric method*** was used to determine the concentration of SO_4^{2-} by precipitation with a 10% barium chloride solution and using an Ohaus Adventure analytical balance. The total Fe concentration

was determined by the ***photocolorimetric method*** with rhodanide using a KFK-2MP photoelectrocolorimeter.

Results

The total salinity of the water in most wells is up to 1 g/dm^3 (fresh water) or 1.5 g/dm^3 (conditionally fresh water). Thus, the waters of wells No. 5', 6, 7', 11, 12, 14 can be classified as fresh and conditionally fresh waters. The water of wells No. 10 and 13 can be considered brackish, where the salinity exceeds 1.5 g/dm^3 in both summer and winter periods. Also, a slight excess (1.6 g/dm^3) of salt content was recorded in the summer in the waters of well No. 9' (Table 1).,

According to the chemical composition of the water, the water quality standards [4] were exceeded in a number of wells (Table 1) and the possible factors that could have caused the exceedance of the standards were considered.

Table 1 Wells with exceedances of water quality standards in accordance with the Sanitary and Epidemiological Standards (ДСанПіН 2.2.4-171-10) [4]

Normative indicator	**Wells with violation of norms**	**Data**	**Concentration, mg/dm^3 (pH – units)**	**Maximum permissible concentration, mg/dm^3**	**Possible factors of violation of norms**
TDS	9'	08.2024	1599.22	≤ 1500	***Natural:*** features of the water-bearing rock; ***Technogenic:*** sewage leaks into the ground
	10	08.2024	1917.22		
		11.2024	1549.39		
	13	08.2024	2126.82		
		11.2024	2106.55		
Cl^-	9'	08.2024	470.9	≤ 350	***Technogenic:*** sewage leaks into the ground, soil salinization due to salt sprinkling on streets in winters, etc.
	10	08.2024	968.5		
		11.2024	429.6		
	13	08.2024	975.8		
		11.2024	833.9		
$Fe^{2+} + Fe^{3+}$	5'	08.2024	7.3	≤ 1.0	***Natural:*** peculiarities of the water-bearing rock (elevated iron levels are quite common in waters of the Quaternary aquifer); ***Technogenic:*** use of steel casing in wells
	6	08.2024	25.6		
		11.2024	9.9		
	9'	08.2024	9.4		
		11.2024	3.5		
	10	08.2024	10.1		
		11.2024	5.4		
	11	08.2024	23		
		11.2024	4.2		
	12	08.2024	27.9		
		11.2024	10.3		
	13	08.2024	3.2		
		11.2024	4.3		
	14	11.2024	3.4		
NH_4^+	11	08.2024	9.9	≤ 2.6	

Normative indicator	Wells with violation of norms	Data	Concentration, mg/dm^3 (pH – units)	Maximum permissible concentration, mg/dm^3	Possible factors of violation of norms
		11.2024	5.1		***Technogenic:*** unorganized sewage leaks into the ground
	12	08.2024	10.1		
		11.2024	5		
$Na^+ + K^+$	13	08.2024	230	≤ 200	Gets into water with chlorides
		11.2024	330		
pH	11	11.2024	6,28	6,5 - 8,5 units	***Natural:*** features of the water-bearing rock; ***Technogenic:*** sewage leaks into the ground

Having analyzed the change in the concentration of the main components of the chemical composition of groundwater and its total salinity (Fig. 4) over time, the studied observation wells can be divided into three groups:

1. No increase in the concentration of the main components and total mineralization was observed in wells No. 6 and 9;

2. A slight increase in the concentration of some of the main components (mainly chloride ions) and total mineralization - holes No. 10, 11, 13. The exception here is hole No. 13, where, despite a minimal increase in total mineralization and other components, a 4-fold increase in Cl- concentration was found;

3. Significant (2 or more times) increase in concentrations of the main components and total mineralization - wells No. 5', 7', 12, 14.

Thus, the water of the wells located in the northern and western parts of the Reserve's territory has either a weakly expressed trend towards an increase in the concentrations of groundwater chemical composition components and total mineralization, or no such trend at all. The water from the wells located in the eastern, southern and central (near the Cathedral) parts of the Reserve's territory has a noticeable upward trend in the concentrations of both individual components and total mineralization.

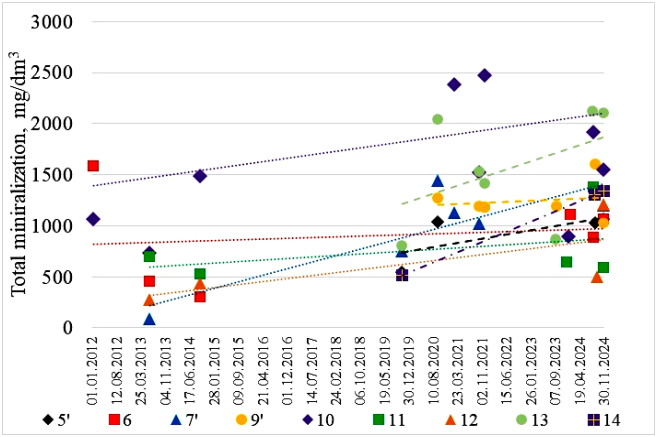


Fig. 2. *Changes of total mineralization in well water during the observation period*

The Piper diagram was used to determine the type of groundwater on the territory of the St Sophia of Kyiv National Conservation Area (Fig. 4). Ca^{2+}, Na^{+}, and K^{+} prevail among the cations. Among the anions are hydrocarbonates, chlorides and sulphates. Thus, the groundwater of the Reserve can be divided into two groups by anionic composition: mixed type with a certain slight predominance of hydrocarbonate ions (wells No. 5', 6, 7', 9', 10, 14) and chloride water (wells No. 11, 12, 13). The cationic composition of the water is of mixed type with a slight predominance of calcium ions and a significant proportion of sodium ions. Thus, the well water is divided into:

1. Mixed type (with a slight predominance of hydrocarbonates) - water from wells No. 5', 6, 7', 9', 10, 14;

2. Calcium chloride - water from wells No. 11 and 12 and calcium-sodium-potassium chloride - water from well No. 13.

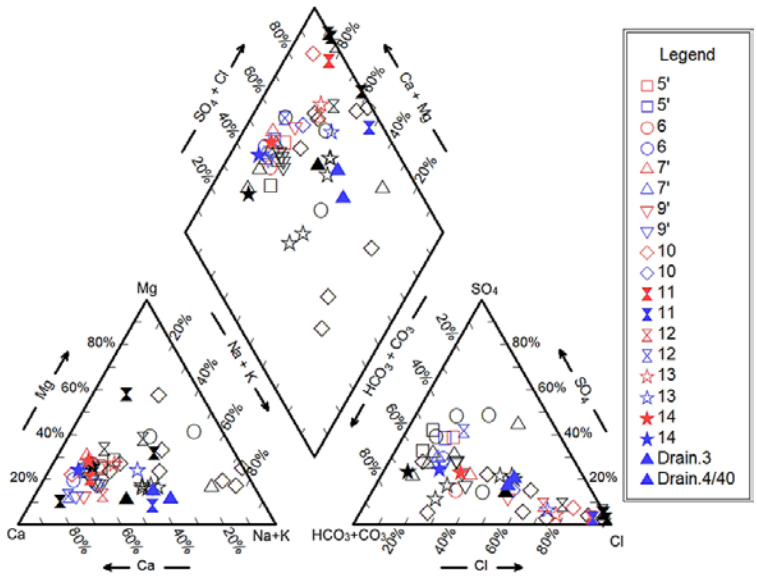


Fig. 4. *Piper diagram of groundwaters of the territory of Reserve Area*

Conclusions

1. Exceedances of the drinking water quality standards established by Sanitary and Epidemiological Norms (ДСанПіН 2.2.4-171-10) were recorded in the water of a number of wells in at least one of the seasons during which the following indicators were studied: chlorides - wells 9', 10, 13; total iron - wells 5', 6, 9', 10, 11, 12, 13, 14; ammonium - wells 11, 12; total sodium + potassium - well 13; pH - well 11; total mineralization - wells 9', 10, 13.

2. It was established that the waters of the wells located in the eastern, southern and central (near the Cathedral) parts of the Reserve (wells No. 5', 7', 12, 14) have a significant trend towards an increase (by 2 or more times) in the concentrations of individual components and total mineralization, which may be the result of the active expansion of the impact of technogenic waters from the urban area around the Reserve, as well as the use of sand and salt topping on the paths in winter.

3. Episodic exceedances of the established standards in the waters of a number of wells by various indicators can be explained by both natural (peculiarities of the composition of the water-bearing rock of moraine sediments) and technological factors (unorganized leaks of sewage, heat supply communications, use of table salt for sprinkling streets in winter). Trends towards a constant, significant increase in a number of water components and total salinity during the monitoring period in the waters of some wells are explained by anthropogenic factors.

4. The water of the Reserve's wells is divided into groups: mixed type (water of wells No. 5', 6, 7', 9', 10, 14); calcium chloride (No. 11, 12); calcium-sodium-potassium chloride (No. 13).

References

1. Koliabina I.L., Yaroshenko K.K. (2024) Carrying out a set of works on hydrogeological monitoring of the territory of the National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv" (study of the chemical composition of groundwater). Final report under the contract No. 227 of 08.08.2024 Kyiv: IGN NAS of Ukraine, 2024. 24 p.

2. Rudenko Y.F., Saprykin V.Y. Hydrogeological monitoring of the territory of the National Conservation Area "St. Sophia of Kyiv" in 2021. Final report under the contract No. 112 of 24.05.2021 Kyiv: SIC RPD of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2021. 48 p.

3. Djepo S.P., Skalsky A.S., Bugay D.O., Saprykin V.Yu. Hydrogeological monitoring of the territory of the National Reserve "Sofia Kievskaya' in 2015. Technical report under the contract from 2015. Kyiv: IGN NAS of Ukraine, 2015.

4. On approval of the State Sanitary Norms and Rules "Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption". ДСанПіН 2.2.4-171-10. Ministry of Health of Ukraine. Kyiv, 2022. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text

ОСОБЛИВОСТІ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ТЕРИТОРІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО ЗАПОВІДНИКА «СОФІЯ КИЇВСЬКА»

Костянтин ЯРОШЕНКО
Інститут геологічних наук Національної академії наук України
вул. Олеся Гончара, 55б, м. Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7180-4642

Ірина КОЛЯБІНА
Інститут геологічних наук Національної академії наук України
вул. Олеся Гончара, 55б, м. Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6120-4491

Володимир САПРИКІН
ДУ "НІЦ радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України"
вул. Олеся Гончара, 55б, м. Київ, 01054, Україна
Національний заповідник «Софія Київська»
вул. Володимирська, 24, м. Київ, 01001, Україна
https://orcid.org/0009-0002-7112-2235

Надія МОЛОЧКОВА
Національний заповідник «Софія Київська»
вул. Володимирська, 24, м. Київ, 01001, Україна

Єгорій ДРАМАРЕЦЬКИЙ
Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
Інститут геологічних наук Національної академії наук України
вул. Олеся Гончара, 55б, м. Київ, 01054, Україна

Анотація

В статті проаналізовано моніторингові дані щодо хімічного складу ґрунтових вод, в дев'яти спостережних свердловинах на території ансамблю споруд Софійського собору, отримані протягом 2012 - 2024 років. За результатами визначення хімічного складу ґрунтових вод території Заповідника зафіксовані перевищення нормативних показників (загальної мінералізації, хлоридів, амонію, натрію та калію, величини pH) у водах ряду свердловин. Встановлено, що води свердловин, розташованих в північній та західній частині території заповідника мають або слабко виражений тренд на підвищення концентрацій компонентів хімічного складу ґрунтових вод та загальної мінералізації, або такий тренд взагалі відсутній, а води свердловин, які розміщені в східній, південній та центральній частині території заповідника мають суттєвий тренд до підвищення концентрацій як окремих компонентів, так і загальної мінералізації. Факти перевищення встановлених норм в водах ряду свердловин заповідника за різними показниками можуть мати природні та техногенні причини, натомість тренди до постійного, суттєвого підвищення ряду компонентів вод та загальної мінералізації мають саме техногенні причини. Визначено, що ґрунтові води території заповідника за своїм складом діляться на дві групи: змішаного типу (з незначним переважанням гідрокарбонат-іонів) та хлоридно-кальцієві.

Ключові слова: ґрунтові води, хімічний склад, моніторинг, Національний заповідник «Софія Київська», мінералізація.

Секція. 3
СТРАТЕГІЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ У КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Section 3.
SUSTAINABLE DEVELOPMENT STRATEGY IN THE CONTEXT OF ENVIRONMENTAL SAFETY

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.343225

ПРОЦЕДУРИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО АУДИТУ ЯК ЕФЕКТИВНІ ІНСТРУМЕНТИ ДОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВ

Поліна БЕЗУГЛА, Даніель БЕНАТОВ
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056
e-mail: pbezuglaa@gmail.com

Анотація

У роботі проаналізовано роль процедур оцінки впливу на довкілля (ОВД) та екологічного аудиту (ЕА) як превентивних інструментів управління екологічними ризиками підприємств. Наведено висновки практичного дослідження 20 кейсів ОВД та ЕА, виконаних у 2022–2024 рр. на базі київської аудиторської компанії «N», назву якої автори не розкривають з огляду на політику конфіденційності. Визначено типові недоліки виконання обох процедур. Проаналізовано висновки постаудиту, що свідчать про ефективність застосованих інструментів ЕА для управління екологічними ризиками. Запропоновано покращення методологічних підходів у рамках здійснення ОВД та ЕА. Підкреслено необхідність посилення законодавчо гарантованого доступу громадськості до висновків ОВД та ЕА, що сприятиме прозорості прийняття управлінських рішень під час проєктування, спорудження та експлуатації підприємств.

Ключові слова: *оцінка впливу на довкілля, екологічний аудит, екологічна безпека, участь громадськості, екологічний моніторинг, промислове підприємство.*

В умовах глобальних геополітичних викликів та курсу України на європейську інтеграцію, питання екологічної безпеки виробництв трансформуються з формальної дозвільної процедури у фактор конкурентоспроможності бізнесу. Процедури оцінки впливу на довкілля (ОВД) та екологічного аудиту (ЕА) виступають фундаментальними інструментами, що дозволяють реалізувати принцип превентивності — запобігання шкоді довкіллю вже на стадії проектування підприємства

Імплементація в національне законодавство Директиви ЄС 2011/92/ЄС (із змінами 2014/52/ЄС) **[1]** та широке застосування положень Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» **[2]** створили нову правову реальність для українського бізнесу. В рамках процедури ОВД, вказані нормативні акти передбачають всебічний аналіз потенційного впливу підприємств на навколишнє середовище (включно зі здоров'ям населення, біорізноманіттям, станом ґрунтів, вод, повітря, клімату тощо). При цьому директивні вимоги гарантують доступ громадськості до інформації та можливість її участі у прийнятті рішень, що підвищує прозорість процедури і довіру населення до державних інституцій. У свою чергу, ЕА є засобом

внутрішнього контролю відповідності діяльності підприємства екологічним нормам і стандартам, а сертифікація за стандартом ISO 14001:2015 **[3]** ефективно формалізує систему екоменеджменту, спрямовану на постійне покращення екологічних показників (від ресурсоефективності до моніторингу забруднень). Водночас, як свідчить практика, перехід від декларативних підходів до реального зменшення техногенного навантаження часто гальмується через низьку якість звітної документації та формальний підхід до виконання досліджень, розрахунків та інспектувань об'єктів в рамках вказаних процедур.

Метою цього дослідження є аналіз практичних аспектів ключових етапів реалізації процедур ОВД та ЕА на базі досвіду аудиторської компанії «N», назву якої автори не розкривають з огляду на політику конфіденційності, визначення типових помилок виконавців та розробка відповідних рекомендацій щодо методологічного покращення вказаних процедур з урахуванням міжнародної практики.

Дослідження базувалося на масиві 20 кейсів ОВД та ЕА для об'єктів агропромислової та харчової промисловості, альтернативної енергетики та водопостачання, виконаних у 2022–2024 рр. Для аналізу матеріалів застосовували такі підходи:

- **контент-аналіз звітів ОВД** для оцінки структури та змісту опису об'єкта, характеристик довкілля і застосованих методик розрахунку викидів / скидів, рівню шуму, забруднення ґрунтів /вод, оцінки впливу на біоту;
- **аналіз результатів польових виїздів та візуального обстеження об'єктів**;
- **моделювання атмосферного забруднення для прогнозування розсіювання газових викидів** з використанням комп'ютерної програми EOL 2021 (згідно з Методикою №309, затвердженою наказом Мінприроди №309 від 10.12.2008) **[4];**
- **геоінформаційний аналіз проммайданчиків** із застосування масивів відкритих даних отриманих з QGIS, Geoportal, OpenStreetMap, для просторового оцінювання впливів об'єктів на екосистеми та населення (зокрема, аналіз близькості до водних об'єктів, заповідних зон тощо);
- **методи екологічного аудиту** (згідно ISO 14001:2015 **[3]** та ISO 19011:2018 **[5]**), зокрема, опитування працівників, перевірка відповідності екологічних процедур і документів міжнародним нормам, верифікація наявності дозволів, звітів про емісію і поводження з відходами тощо;
- **оцінка та ранжування ризиків** за допомогою якісної матриці небезпек за методикою NIRAS **[6]**.

Аналіз звітів ОВД показав, що найбільш добре пропрацьованими розділами є *опис планованої діяльності підприємства* та *характеристика природного середовища* прилеглого до проммайданчика.

Водночас до недоліків проаналізованих звітів можна віднести:

- відсутність альтернативних варіантів реалізації оцінюваного проєкту;
- виконання прогнозування впливу об'єкту на стан атмосферного повітря із врахуванням обмеженого якісного складу компонентів забруднення та без урахування показників фонового забруднення (у ~30% звітів відсутня оцінка кумулятивного впливу на атмосферне повітря від сусідніх з об'єктом оцінювання стаціонарних джерел викидів);
- розділ щодо участі громадськості у процедурах, регламентованих чинним законодавством, нерідко носить формальний характер (публікації в ЗМІ мають місце, але реальне залучення зацікавлених осіб та екологічних організацій часто обмежується мінімальним інформуванням);
- оцінка впливу на біоту – у ~70% звітів зводиться до опису загальних характеристик прилеглих територій без натурного обстеження його видового складу).

Аналіз висновків ЕА показав доволі високу ефективність застосування вказаної процедури. Так, за даними постаудиту: на кількох підприємствах було впроваджено сортування та вторинну переробку відходів безпосередньо в цехах, що призвело до зниження обсягів твердих відходів на 25–30%, а на підприємстві з виробництва біоетанолу було модернізовано водооборотну систему, внаслідок чого водоспоживання скоротилося приблизно на 40%, та суттєво зменшено об'єм стічних вод.

На нашу думку до недоліків проаналізованих звітів ЕА можна віднести:

- **формальність (декларативну природу) затвердженої екологічної політики об'єктів аудиту**, що однак приймається аудитором за належну, при цьому реальний вплив на екологічний менеджмент відповідних положень є мінімальним через відсутність чіткого контролю виконання поставлених завдань;
- **поверхневе вивчення викидів у атмосферу в контексті екосистемного впливу об'єкту аудиту та наявності у викидах парникових газів та** (аудитори мало уваги приділяють моніторингу вуглецевого сліду підприємств та / або аналізу впливу об'єкту на водно-болотні угіддя та /або фрагментацію ландшафтів, хоча ці аспекти мають вирішальне значення для додержання підприємствами критеріїв стійкого розвитку).

Висновки

Процедури оцінки впливу на довкілля та екологічного аудиту є взаємодоповнюючими механізмами екологічної безпеки підприємств. ОВД закладає фундамент безпеки на етапі проєктування, а ЕА забезпечує контроль та вдосконалення на етапі експлуатації. Синергетична ефективність ОВД та ЕА напряму залежить від додержання їх виконавцями методології досліджень, базові засади якої визначені у відповідних нормативних документах.

Для підвищення якості процедур ОВД та ЕА пропонується:

1. **Покращення доступу громадськості до результатів звітності за ОВД та ЕА шляхом** інтеграції результатів моніторингу підприємств у єдину державну систему для створення прозорої бази даних фонового забруднення та посилення громадського контролю.
2. **Вдосконалення методології ОВД,** шляхом обов'язкового врахування кумулятивного ефекту через моделювання сумарного впливу всіх джерел забруднень у зоні впливу об'єкта, а не лише власних джерел підприємства.
3. **Посилення постаудитного скрінінгу, шляхом** впровадження механізму обов'язкового моніторингу реалізації екологічних умов, прописаних у висновку з ОВД або ЕА, через 1–3 роки після початку діяльності або отримання висновку ЕА.
4. **Покращення освітнього компоненту екологічної політики держави** через підвищення кваліфікації штатних екологів підприємств щодо сучасних методів оцінки ризиків та вимог міжнародних стандартів ISO.

Запропоновані покращення дозволять не лише краще дотримуватися вимог природоохоронного законодавства, але й сприятиме сталому розвитку підприємств, підвищенню їх інвестиційної привабливості та адаптації до екологічних стандартів ЄС.

Література:

1. Директива 2011/92/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 13 грудня 2011 р. про оцінку впливу деяких державних і приватних проектів на довкілля (із змінами, внесеними Директивою 2014/52/ЄС).
2. Закон України Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23 травня 2017 р. № 2059-VIII // Відомості Верховної Ради України. – 2017. – № 29. – Ст. 315.

3. ISO 14001:2015 Environmental management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

4. Про затвердження Методики розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища: наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 10.12.2008 № 309.

5. ISO 19011:2018 Guidelines for auditing management systems. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

6. NIRAS. Environmental Impact Assessments: Selected references [Електронний ресурс]. – 03.05.2023. – 13 р. – Режим доступу: https://www.niras.com/media/3nsa4ese/0-environmental-assessment.pdf (дата звернення: 01.05.2025).

PROCEDURES FOR ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AND ENVIRONMENTAL AUDITING AS EFFECTIVE TOOLS FOR ENSURING ENTERPRISES' ENVIRONMENTAL SAFETY

Polina BEZUGLA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056

Daniel BENATOV
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056
https://orcid.org/0000-0001-9626-6759

Abstract

The paper analyses the role of environmental impact assessment (EIA) and environmental audit (EA) procedures as preventive tools for managing environmental risks at industrial enterprises. The findings of an empirical study of 20 EIA and EA cases carried out in 2022–2024 on the basis of a Kyiv-based auditing company "N", whose name is not disclosed due to confidentiality policy, are presented. Typical shortcomings of both procedures are identified. The conclusions of post-audit assessments are analysed, demonstrating the effectiveness of EA tools applied for environmental risk management. Improvements to methodological approaches within the mentioned procedures are proposed. The need to strengthen the legally guaranteed public access to EIA and EA statements is emphasised, as this would enhance the transparency of decision-making during the design, construction and operation of enterprises.

Keywords: environmental impact assessment, environmental audit, environmental safety, public participation, environmental monitoring, industrial enterprise.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329814

DISCOURSE ON METROPOLITAN EVOLUTION: NAVIGATING URBAN POLLUTION FLUXES, CLIMATE CHANGE, AND THE DATA PREDICTIVE MODEL FOR GREEN INFRASTRUCTURE

Juris BURLAKOVS[1], Maris KRIEVANS[1,2], Zane VINCEVICA-GAILE[2], Inga GRINFELDE[3], Martins VILNITIS[1]
[1] *Riga Technical University*
Kipsalas 6A, LV-1048, Riga, Latvia
[2]*University of Latvia*
Jelgavas Street 1, LV-1004 Riga, Latvia
[3] *Latvia University of Life Sciences and Technologies*
Liela Street 2, LV-3001 Jelgava, Latvia
e-mail: juris@geo-it.lv

Abstract:
Urban environments are significant contributors to environmental pollution through surface discharge and atmospheric deposition. These emissions originate from diverse sources, including transportation, industrial brownfields, wastewater treatment facilities, and contaminated air masses. This pollution encompasses a wide range of anthropogenic contaminants such as organic chemicals, petroleum hydrocarbons, solvents, toxic metals, and metalloids, making it a complex global issue. We address this challenge by focusing on the quantification and analysis of urban pollution fluxes in both spatial and temporal contexts. Specifically, the project targets urban, near-coastal, and industrial sites, aiming to develop advanced solutions for data-driven environmental modeling, which are crucial for effective green infrastructure planning. A critical aspect of study is the concept of the "urban halo" effect, wherein pollutants originating within cities extend beyond their boundaries, impacting surrounding ecosystems. This phenomenon is influenced by the nature of the contaminants and their mode of entry into the environment. The project employs two primary approaches to urban hydrological modeling: one examines the influence of urbanization within a defined catchment area, while the other constructs hydrological models with specific boundary settings. Both approaches facilitate a deeper understanding of pollution dynamics and their interactions with climate variables.

The overarching objective is to achieve a comprehensive assessment of the interactions between urban pollutants and climate dynamics, thereby advancing our understanding of geochemical fluxes under changing climate conditions. By leveraging this knowledge, the project aims to develop data-driven predictive environmental models, supporting the design and implementation of resilient green infrastructure strategies. These outcomes will not only enhance pollution management but also promote sustainable urban development in vulnerable regions.

Keywords: *urban pollution, geochemical fluxes, hydrological modeling, green infrastructure, climate dynamics.*

Significant amount of environmental contamination and water pollution is related to the surface discharge and atmospheric deposition being exhausted by transport emissions, industrial brownfields, wastewater treatment facilities, polluted air masses. Contamination from anthropogenic sources may release various pollutants including organic chemicals, petroleum hydrocarbons, solvents, toxic metals and metalloids **[1]**. However, the modern society produce a lot of emerging pollutants that are not understood well yet. Sustainable remediation as well as prevention of emerging pollutants coming into the environment provide benefits to human health and the environment. The best solution would be to prevent the sources of pollutants to cease out; however, this might seem utopic idea for next few decades when environmentally neutral materials and perfect recycling would be achieved. On the other hand, the diffuse pollution of various substances is almost not possible to prevent coming into biological chains however the green infrastructure solutions which would prevent those coming to, e.g., rivers and seas, would be important step towards achieving sustainability. By urban runoff and especially stormwater flushes this pollution have greatest fluxes towards watersheds and from diffuse pollution transform to the point source as water urban runoff (**fig. 1**) is mostly collected in several single points and we cannot estimate changes of these fluxes during stochastic events. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has stated that the frequency of extreme precipitation is expected to grow over midlatitude regions by the end of the century. This is consistent with the Clausius-Clapeyron (CC) equation, which states that atmospheric water vapor pressure increases at a rate of 7% $°C^{-1}$ of warming. However, the relationship between warming and precipitation, and particularly with extreme precipitation, is complex and depends on many factors such as type, return period, and duration of rainfall. Currently, a significantly large body of literature is available on the impacts of climate change on water resources.

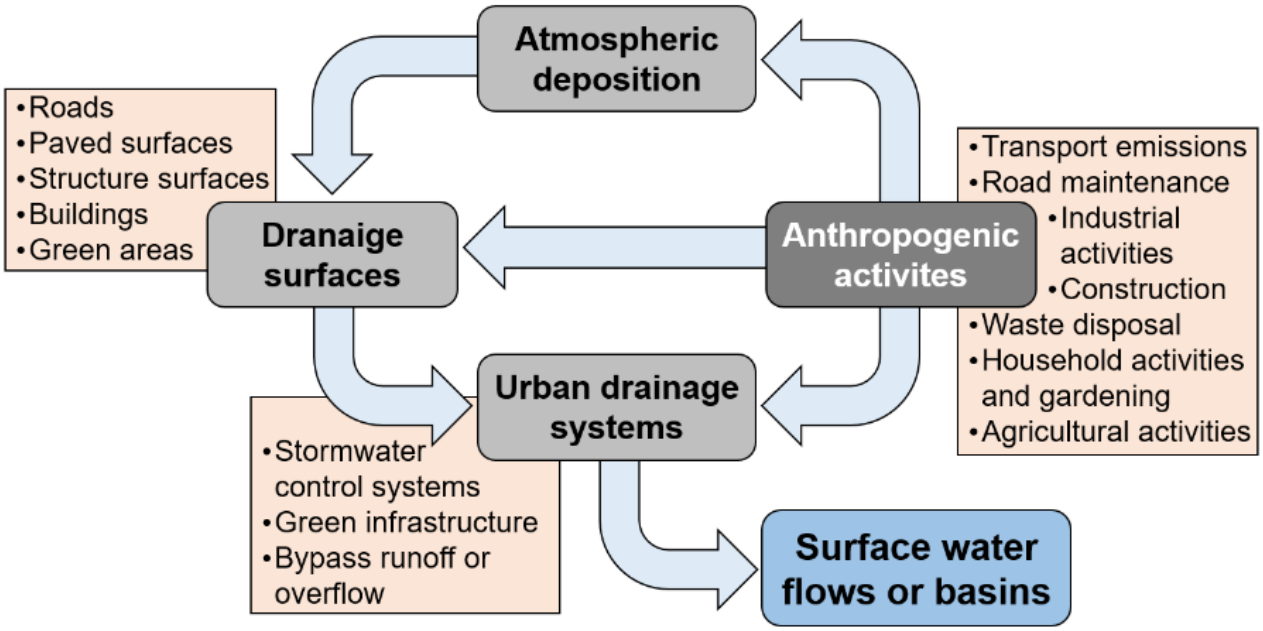


Fig. 1. *Stormwater pollution sources*

The list of problems for finding solutions is: toxicity of contaminants; pH levels promoting mobility of contaminants; excess sodium, sulfates and chlorides, significant amounts of heavy metals, microplastics and emerging pollutants coming in relatively tiny concentrations, but in high amounts during stormwater flushes **[2, 3]**. Managing the risks posed by contaminants at stormwater treatment and outflow sites involves understanding the possible pathways and applying appropriate measures

to measure, monitor in time and space, discover best options for treatment, or remove sources, adding amendment substances and green infrastructure buffers in appropriate places where the problem is solved before it enters back in diffuse pollution state. We need improve soil geochemistry and promote environment in a combined way to reduce toxicity, emission risks and stabilize physical properties, at the same time minimizing or eliminating energy consumption or the consumption of other natural resources by using natural resources and mimicking nature processes when designing green infrastructure.

The discharge of hazardous substances from urban areas into water basins continues to be high. Three factors contribute to this increase:

1. Many areas have sources of potentially hazardous substances as parts of cities are built on and/or around areas with artificial landfills, or brownfields. Floods affect many sources of potentially harmful elements: old waste dumps, manmade fillings, roads and railroads, contaminated soils, harbor areas, fuel and chemical storages **[4]**.
2. Cities expand and density into these areas **[5]**. The increase in sealed surfaces and artificial surfaces (e.g., roofs) leads to increased surface runoff, which also affects urban flood patterns.
3. Climate change causes increases in precipitation and cloudbursts. These three factors lead to an increase surface and subsurface discharge and subsequent increase of hazardous substances discharge **[6]**.

Cities that have not yet started to deal with increasing surface and subsurface discharge like to learn from experiences made so far and how to improve them, also respecting hazardous substances. Urban geochemical processes profoundly impact harmful substances in cities, altering their distribution and causing distinctive environmental effects. A study **[7]** highlighted gaps in ecosystem models, not considering human-induced changes like altered water flow, structures, and urban development. These shifts affect substance movement and retention, leading to unique urban flooding. Urban areas experience water quality changes due to altered flow, temperature, sedimentation, and habitats. Chemicals quickly enter aquatic systems, modifying their behavior and movement from soil to water bodies. Urban waste and emissions spread beyond cities, depending on their properties and introduction into the environment – a phenomenon termed the "urban halo effect" **[8]**, involving atmospheric and waterborne transportation. Traffic-driven air pollution poses a significant global health risk due to daily exposure to vehicle-generated dust particles. Metals from tires, brakes, and exhaust contribute to diverse car-related pollutants. Road dust directly threatens human health through ingestion, inhalation, and skin contact. Generally, urban soils serve as a storage for most solid and chemical pollutants from atmospheric deposition. The issue of lead contamination from historic gasoline usage is exacerbated today by catalytic converters, which introduce platinum group elements (PGEs), mainly Pt and Pd, into the environment. A study **[9]** revealed that high PGE concentrations align significantly with Pb anomalies in Naples, Italy's soil along the city's road network. Urban brownfield sites, remnants of past industrial activity, release inorganic and organic pollutants, posing a health risk to residents **[10]**. The USA has an estimated 400,000 to 500,000 brownfields, Europe has 300,000 to 1.5 million, and Canada has over 30,000 **[11, 12]**. As cities expand, brownfield sites are attractive for redevelopment, emphasizing the need for proper remediation before reuse to prevent harm to human health. For example, the Bagnoli brownfield area in Naples, is still releasing metals and organic compounds years after industrial activity **[13]**. Urban stormwater management (fig. 2) is a critical concern, particularly in cities with outdated or combined sewage treatment plants. These plants struggle to handle the large volumes of water during heavy rains, resulting in untreated water overflows that significantly pollute downstream bodies of water. Outdated treatment plants often inadequately remove contaminants like salts, soluble phosphorus, bacteria, endocrine-disrupting chemicals (EDCs), and pharmaceutical and personal-care products

(PPCPs) from the final effluent, posing a human health threat **[14]**. EDCs and PPCPs, considered emerging contaminants, are found in urban watercourses worldwide, presenting potential health risks if ingested **[15]**. These emerging contaminants encompass everyday use compounds, such as pharmaceuticals, detergents, plasticizers, and industrial additives, suspected to be harmful if introduced into the human body. The role of some inorganic contaminants such as toxic metals, including Hg and REEs, has been studied to a small extent with greater attention only to Hg. Studies indicate the estimated median total Hg concentration in, e.g., beach wrack 7.6 ng/g dry weight; then 1 km long beach segment may receive 6 g of Hg per season, adversely affecting flora and fauna. Nevertheless, a broad and consistent investigation of inorganic contaminants over several seasons has not been performed in the selected area. Therefore, biogeochemical cycling analysis of elements of concern can give valuable information to understand the integrated environmental processes. The growing contribution of recycled Hg, including the legacy of previous anthropogenic emissions, is driven by climate change and increasing anthropogenic pressures affecting all ecosystems **[16, 17]**. The consequences of the perturbed global Hg cycle are expected to be more severe for the marine environment, compared to terrestrial and freshwater ecosystems **[18]**. The marine ecosystem is particularly vulnerable to Hg contamination, as it originates from different sources, including not only atmospheric deposition but also waterborne input and direct point sources located on land and sea **[19, 20]**.

Anthropogenic activities can result in the relocation of contaminants such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs), microplastics and even pharmaceuticals from shipping channels, harbours, and ports into the marine environment where these components may exert a negative effect on the marine ecosystem. Defined primary contaminants are all persistent in the marine environment and have a significant anthropogenic input. PAHs can be naturally released during forest fires and by volcanic activity, but are mainly linked to anthropogenic sources such as fossil fuel burning, waste incineration, oil refining, oil spills, and industrial and agricultural outfalls. PCBs were used as coolants, plasticisers and lubricants, and were banned in the mid-'80s, however, remaining sources such as old equipment, disposal of waste and transport of contaminated sediments, still contribute to contamination in the marine environment. Both PAHs and PCBs have a slow degradation rate in anaerobic sediment, allowing for their bioaccumulation and biomagnification in the marine environment **[21]**. Metals can be naturally released into the environment due to volcanic eruption, sea-salt sprays, forest fires, biogenic sources and rock weathering, a process where metals are released from their endemic spheres into the environment **[22]**.

Pharmaceutical residues have become a serious global concern due to their release from various sources, including hospitals, industries, and domestic activities **[23, 24]**. Improper management of these wastes leads to environmental contamination, particularly in developing countries **[25]**. Studies show that certain pharmaceuticals like IBU, GEM, and SMX can achieve >99% biodegradation during soil composting **[26]**. Understanding pharmaceutical biodegradation in urban settings is critical.

Urban hydrological models are classified by time and space scales, with two main approaches: catchment-scale models covering broad time-space dimensions and city-scale models with finer resolution. Over 50% of small-area models (<10 km²) use time steps of 6 minutes or less, while larger areas (>10 km²) often adopt 1-hour intervals. GIS tools (ArcView, ArcGIS, ArcInfo) are widely used for data processing and model parameterization, leveraging digital models for catchment boundary determination. Remote sensing, including LIDAR and rainfall radar, supports model precision **[27,28]**. Hydrodynamic routing and hydraulic modeling are fundamental for simulating urban water systems, with methods ranging from conceptual equations to the de Saint Venant equations.

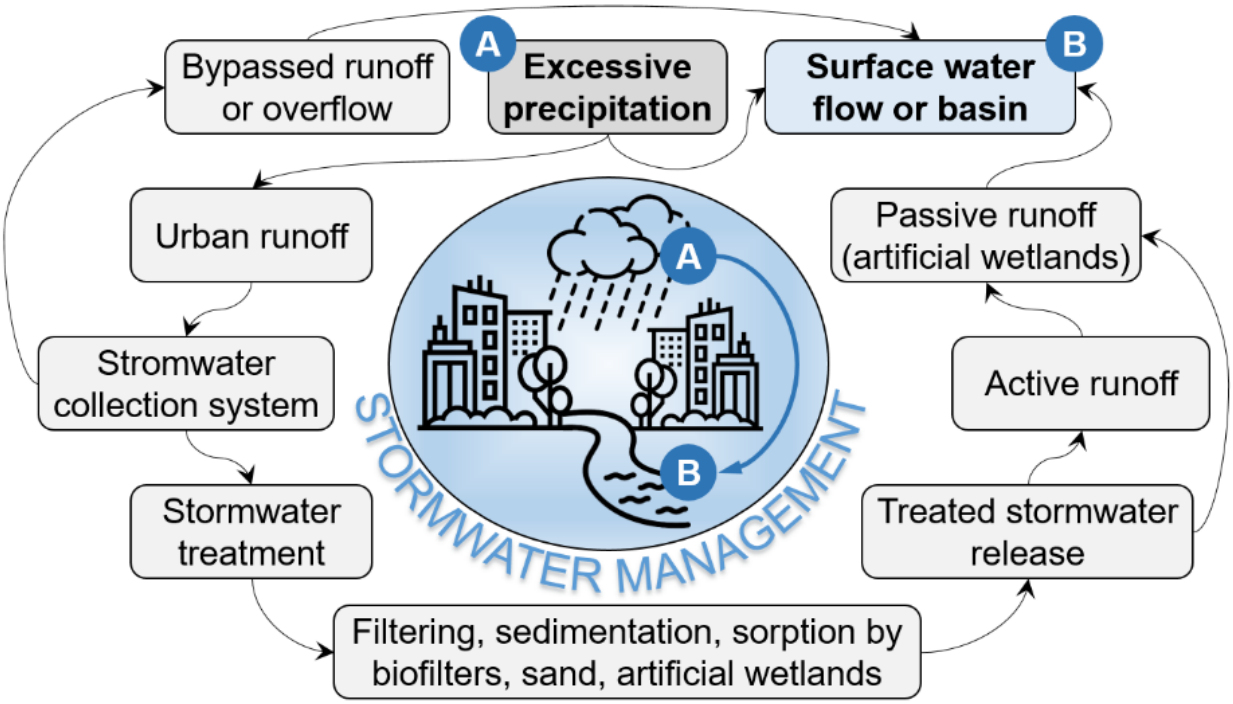


Fig. 2. *Stormwater management in urban areas*

Urban hydrology differs from classical hydraulics primarily in scale, emphasizing surface runoff, rainwater collection, and sewer systems. Model developers must balance complexity with purpose, choosing processes and detail levels to suit their objectives. Such models are essential for understanding urbanization's impact on infiltration, runoff, and drainage formation **[29,30]**.

References

1. Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Rana Qureshi, S., & Wang, M.-Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. Toxics, 9, 42.
2. Megharaj, M., & Naidu, R. (2017). Soil and brownfield bioremediation. Microbial Biotechnology, 10(5), 1244–1249. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12840
3. Vincevica-Gaile, Z., Stapkevica, M., Stankevica, K., & Burlakovs, J. (2015). Testing sapropel (gyttja) as soil amendment: Assessment of plant germination and early seedling development. Research for Rural Development, 1, 88–94.
4. De Vivo, B., & Lima, A. (2018). The Bagnoli-Napoli Brownfield Site in Italy: Before and After the Remediation. In Environmental Geochemistry: Site Characterization, Data Analysis and Case Histories: Second Edition (2nd ed.). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63763-5.00008-2
5. Manninen, A. (2011). European Metropolises. Recession and Recovery. Int. Statistical Inst.: Proc. 58th World Statistical Congress, Dublin.
6. Nyberg, L., Hakkarainen, H., Blumenthal, B., & Moberg, J.-O. (2019). Konsekvenser av sommarskyfall i Sverige under åren 2009-2018 - analys av rapportering i dagstidningar.
7. Kaye, J. P., Groffman, P. M., Grimm, N. B., Baker, L. A., & Pouyat, R. V. (2006). A distinct urban biogeochemistry? Trends in Ecology and Evolution, 21(4), 192–199. https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.12.006

8. Diamond, M. L., & Hodge, E. (2007). Urban contaminant dynamics: From source to effect. Environmental Science and Technology, 41(11), 2796–3805. https://doi.org/10.1021/es072542n

9. Cicchella, D., De Vivo, B., Lima, A., Albanese, S., McGill, R. A. R., & Parrish, R. R. (2008). Heavy metal pollution and Pb isotopes in urban soils of Napoli, Italy. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 8(1), 103–112. https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-148

10. Thornton, I., Farago, M.E., Thums, C.R. et al. Urban geochemistry: research strategies to assist risk assessment and remediation of brownfield sites in urban areas. Environ Geochem Health 30, 565–576 (2008). https://doi.org/10.1007/s10653-008-9182-9

11. Litt, J. S., & Burke, T. A. (2002). Uncovering the historic environmental hazards of urban brownfields. Journal of Urban Health, 79(4), 464–481. https://doi.org/10.1093/jurban/79.4.464

12. NRTEE (2003) Cleaning up the past, building the future—a national brownfield redevelopment strategy for Canada. National Round Table on the Environment and the Economy, Renouf Publishing, Ottawa, 81.

13. Albanese, S., De Vivo, B., Lima, A., Cicchella, D., Civitillo, D., & Cosenza, A. (2010). Geochemical baselines and risk assessment of the Bagnoli brownfield site coastal sea sediments (Naples, Italy). Journal of Geochemical Exploration, 105(1–2), 19–33. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.01.007

14. Boyd, G. R., Palmeri, J. M., Zhang, S., & Grimm, D. A. (2004). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and endocrine disrupting chemicals (EDCs) in stormwater canals and Bayou St. John in New Orleans, Louisiana, USA. Science of the Total Environment, 333(1–3), 137–148. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.018

15. Rahman, M. F., Yanful, E. K., & Jasim, S. Y. (2009). Endocrine disrupting compounds (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment: Implications for the drinking water industry and global environmental health. Journal of Water and Health, 7(2), 224–243. https://doi.org/10.2166/wh.2009.021

16. Reusch, T. B. H., Dierking, J., Andersson, H. C., Bonsdorff, E., Carstensen, J., Casini, M., Czajkowski, M., Hasler, B., Hinsby, K., Hyytiäinen, K., Johannesson, K., Jomaa, S., Jormalainen, V., Kuosa, H., Kurland, S., Laikre, L., MacKenzie, B. R., Margonski, P., Melzner, F., … Zandersen, M. (2018). The Baltic Sea as a time machine for the future coastal ocean. Science Advances, 4(5). https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8195

17. Reckermann, M., Omstedt, A., Soomere, T., Aigars, J., Akhtar, N., Bełdowska, M., Bełdowski, J., Cronin, T., Czub, M., Eero, M., Hyytiäinen, K. P., Jalkanen, J. P., Kiessling, A., Kjellström, E., Kuliński, K., Larsén, X. G., McCrackin, M., Meier, H. E. M., Oberbeckmann, S., … Zorita, E. (2022). Human impacts and their interactions in the Baltic Sea region. Earth System Dynamics, 13(1), 1–80. https://doi.org/10.5194/esd-13-1-2022

18. Amos, H. M., Jacob, D. J., Streets, D. G., & Sunderland, E. M. (2013). Legacy impacts of all-time anthropogenic emissions on the global mercury cycle. Global Biogeochemical Cycles, 27(2), 410–421. https://doi.org/10.1002/gbc.20040

19. Liu, M., Zhang, Q., Maavara, T., Liu, S., Wang, X., & Raymond, P. A. (2021). Author Correction: Rivers as the largest source of mercury to coastal oceans worldwide (Nature Geoscience, (2021), 14, 9, (672-677), 10.1038/s41561-021-00793-2). Nature Geoscience, 14(12), 956. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00839-5

20. Vanavermaete, D., Hostens, K., Le, H. M., Lessuise, A., Ruttens, A., Waegeneers, N., & De Witte, B. (2023). Short- and long-term assessment of PAH, PCB, and metal contamination in the Belgian part of the North Sea. Chemosphere, 310(August 2022). https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136905

21. Frapiccini, E., Giuseppe, S., Stefano, G., Mattia, B., & Mauro, M. (2017). Comparison of Lindane and Carbaryl Pesticide Bioaccumulation in the Common Sole (Solea solea). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 98(5), 656–661. https://doi.org/10.1007/s00128-017-2056-z

22. Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). Environmental Contamination by Heavy Metals. Heavy Metals. https://doi.org/10.5772/intechopen.76082

23. Hawash, H. B., Moneer, A. A., Galhoum, A. A., Elgarahy, A. M., Mohamed, W. A. A., Samy, M., El-Seedi, H. R., Gaballah, M. S., Mubarak, M. F., & Attia, N. F. (2023). Occurrence and spatial distribution of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment, their characteristics, and adopted legislations. Journal of Water Process Engineering, 52(January), 103490. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103490

24. Mahapatra, I., Clark, J. R. A., Dobson, P. J., Owen, R., Lynch, I., & Lead, J. R. (2018). Expert perspectives on potential environmental risks from nanomedicines and adequacy of the current guideline on environmental risk assessment. Environmental Science: Nano, 5(8), 1873–1889. https://doi.org/10.1039/c8en00053k

25. Gworek, B., Kijeńska, M., Wrzosek, J., & Graniewska, M. (2021). Pharmaceuticals in the Soil and Plant Environment: a Review. Water, Air, and Soil Pollution, 232(4). https://doi.org/10.1007/s11270-020-04954-8

26. Biel-Maeso, M., González-González, C., Lara-Martín, P. A., & Corada-Fernández, C. (2019). Sorption and degradation of contaminants of emerging concern in soils under aerobic and anaerobic conditions. Science of the Total Environment, 666, 662–671. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.279

27. Easton, Z. M., Gérard-Marchant, P., Walter, M. T., Petrovic, A. M., & Steenhuis, T. S. (2007). Hydrologic assessment of an urban variable source watershed in the northeast United States. Water Resources Research, 43(3). https://doi.org/10.1029/2006WR005076

28. McColl, C., & Aggett, G. (2007). Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. Journal of Environmental Management, 84(4), 494–512. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2006.06.023

29. Dixon, B., & Earls, J. (2012). Effects of urbanization on streamflow using SWAT with real and simulated meteorological data. Applied Geography, 35(1–2), 174–190. https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2012.06.010

30. Valeo, C., & Moin, S. M. A. (2000). Grid-resolution effects on a model for integrating urban and rural areas. Hydrological Processes, 14(14), 2505–2525. https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2505::AID-HYP111>3.0.CO;2-3

ДИСКУРС ЩОДО ЕВОЛЮЦІЇ МЕГАПОЛІСІВ: УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ ПОТОКАМИ ЗАБРУДНЕННЯ, ЗМІНАМИ КЛІМАТУ ТА ПРОГНОЗНОЮ МОДЕЛЛЮ ДАНИХ ДЛЯ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Юріс БУРЛАКОВС
Ризький технічний університет
Kipsalas 6A, LV-1048, Riga, Латвія
https://orcid.org/0000-0003-0269-4790

Маріс КРІЕВАНС
Ризький технічний університет
Kipsalas 6A, LV-1048, Riga, Латвія
Латвійський університет
Jelgavas Street 1, LV-1004 Riga, Latvia
https://orcid.org/0000-0001-7199-1030

Зане ВІНЦЕВІЦА-ҐАЙЛЕ
Латвійський університет
Jelgavas Street 1, LV-1004 Riga, Латвія
https://orcid.org/0000-0003-2868-0434

Інга ГРІНФЕЛДЕ
Латвійський університет сільського господарства і технологій
Liela Street 2, LV-3001 Jelgava, Латвія
https://orcid.org/0000-0002-3220-1777

Мартінс ВІЛНІТІС
Ризький технічний університет
Kipsalas 6A, LV-1048, Riga, Латвія
https://orcid.org/0000-0003-4413-5292

Анотація

Міські середовища значною мірою сприяють забрудненню довкілля через поверхневі стоки й атмосферні осади. Такі викиди походять із різноманітних джерел, включаючи транспорт, промислові території (браунфілди), станції очищення стічних вод та забруднені повітряні маси. Це забруднення охоплює широкий спектр антропогенних забруднювачів, таких як органічні речовини, нафтові вуглеводні, розчинники, токсичні метали й металоїди, що робить його складною глобальною проблемою. Ми підходимо до вирішення цього питання шляхом кількісної оцінки та аналізу міських забруднювальних потоків у просторовому й часовому контекстах.

Конкретно цей проєкт орієнтується на міські, прибережні та промислові території, маючи на меті розробку передових рішень у сфері екологічного моделювання на основі даних, що є критично важливим для ефективного планування зеленої інфраструктури. Важливим аспектом дослідження є концепція ефекту «міського гало», за якої забруднювачі, що виникають у містах, поширюються за межі їхніх територій, негативно впливаючи на навколишні екосистеми. Це явище залежить від характеру забруднювачів та способу їх проникнення в довкілля. Проєкт використовує два основні підходи до міського гідрологічного моделювання:

перший досліджує вплив урбанізації в межах визначеного водозбірного басейну, другий створює гідрологічні моделі із заданими граничними умовами. Обидва підходи сприяють глибшому розумінню динаміки забруднень та їх взаємодії з кліматичними факторами.

Загальна мета полягає в комплексній оцінці взаємодії між міськими забруднювачами та динамікою клімату, що дозволить поглибити розуміння геохімічних потоків в умовах зміни клімату. Використовуючи отримані знання, проєкт прагне розробити прогностичні екологічні моделі на основі даних, які допоможуть у розробці та реалізації стійких стратегій зеленої інфраструктури. Ці результати дозволять не лише покращити управління забрудненням, але й сприятимуть сталому розвитку міських територій у регіонах, що є найбільш вразливими до змін клімату.

Ключові слова: міське забруднення, геохімічні потоки, гідрологічне моделювання, зелена інфраструктура, кліматична динаміка.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329332

СТАЛИЙ РОЗВИТОК ПРАТ «УКРГРАФІТ» У ПЕРІОД ВОЄННОГО КОНФЛІКТУ

Андрій ВАГІН[1], Олена ІВАНЕНКО[2], Євген ПАНОВ[2], Артем МАРТИНЮК[2]
[1]*Приватне акціонерне товариство «Український графіт»*
Північне шосе, 20, Запорізька обл., м. Запоріжжя 69006, Україна
[2]*Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського*
проспект Берестейський, 37, м. Київ 03056, Україна
e-mail: artemmartyniuk1123@gmail.com

Анотація

Промислові підприємства є одними з ключових джерел техногенного навантаження на довкілля, що спричиняють комплексне забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів та ґрунтів. Одним із найбільш значущих джерел промислових викидів в Україні є ПрАТ «Укрграфіт» – підприємство, що виробляє графітовану продукцію, зокрема електроди, які широко використовуються в металургійній галузі. У період воєнного конфлікту екологічні виклики суттєво зростають через порушення системи державного екологічного моніторингу, руйнування природоохоронної інфраструктури, скорочення фінансування на заходи з охорони довкілля та загальне зниження ефективності екологічного менеджменту.

Ключові слова: *екологічна безпека, промислові підприємства, сталий розвиток, газоочисні системи, екологічний моніторинг, сумарний неканцерогенний ризик.*

Неконтрольоване забруднення повітря має значні наслідки для довкілля та здоров'я населення. Індивідуальний ризик смертності (IRM) у зоні впливу великих промислових підприємств може перевищувати допустимий рівень у 1,5–2 рази [1,2]. У випадку ПрАТ «Укрграфіт» ці показники можуть бути ще вищими через високу концентрацію суспендованих частинок у приземному шарі атмосфери. Проведені моніторингові та епідеміологічні дослідження в багатьох країнах світу доводять, що численні ефекти для здоров'я, зокрема, захворювання та смерть від респіраторної та серцево-судинної патології, спричиняються саме забрудненням атмосферного повітря твердими частками пилу, особливо з діаметром менше 10 мкм ($PM_{2.5}$; PM_{10}) [3].

Невирішеною частиною наукової проблеми є розробка ефективних заходів з мінімізації забруднення в умовах воєнного та повоєнного станів. Одним із важливих напрямів є впровадження сучасних систем очищення викидів від твердих частинок, зокрема, високоефективних рукавних та електростатичних фільтрів. Ці технології здатні значно зменшити вміст шкідливих частинок у викидах, однак їх широке застосування вимагає детального аналізу економічної доцільності та ефективності в умовах післявоєнної відбудови.

Оцінка впливу промислових підприємств на атмосферне повітря та здоров'я населення є важливим напрямом наукових досліджень, що охоплює різні методики аналізу ризиків,

математичного моделювання розсіювання забруднюючих речовин та розробки технологій мінімізації шкідливих викидів (рис. 1 – рис. 2).

Дане дослідження спрямоване на визначення вмісту часток пилу, зокрема $PM_{2.5}$ та PM_{10} у викидах ПрАТ «Укрграфіт» та оцінку сумарного неканцерогенного ризику для здоров'я населення.

Для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із викидами ПрАТ «Укрграфіт», та розробки заходів щодо їх мінімізації було використано комплексний підхід, що включає аналіз даних екологічного моніторингу, математичне моделювання розсіювання забруднюючих речовин, оцінку ризиків для здоров'я населення та аналіз ефективності природоохоронних заходів [4].

Для розрахунку та оцінки неканцерогенних ризиків за коефіцієнтами небезпеки (HQ) для здоров'я експонованого населення, що зазнає впливу від забруднення атмосферного повітря викидами стаціонарних джерел діючого підприємства, відповідно до наданих матеріалів було включено до дослідження стаціонарні джерела викидів ПрАТ «Укрграфіт». Застосована методика оцінки екологічних ризиків базується на комплексному підході, що поєднує аналіз екологічного моніторингу, математичне моделювання та оцінку впливу на здоров'я населення.

Оцінку ризику розвитку неканцерогенних ефектів здійснюють шляхом визначення коефіцієнтів небезпеки (HQ) – порівняння фактичного рівня впливу сполук з безпечними (референтними):

$$HQ = C / RfC \quad (1),$$

де: HQ - коефіцієнт небезпеки;
C – рівень впливу речовини, мг/м^3 ;
RfC – безпечний рівень впливу (референтна концентрація), мг/м^3 .

Оцінка неканцерогенних ризиків свідчить про перевищення мінімального рівня сумарного неканцерогенного ризику в межах санітарно-захисної зони підприємства. Неканцерогенні ризики, спричинені вдиханням завислих часток, є особливо значущими для вразливих груп населення, зокрема дітей та осіб похилого віку [5].

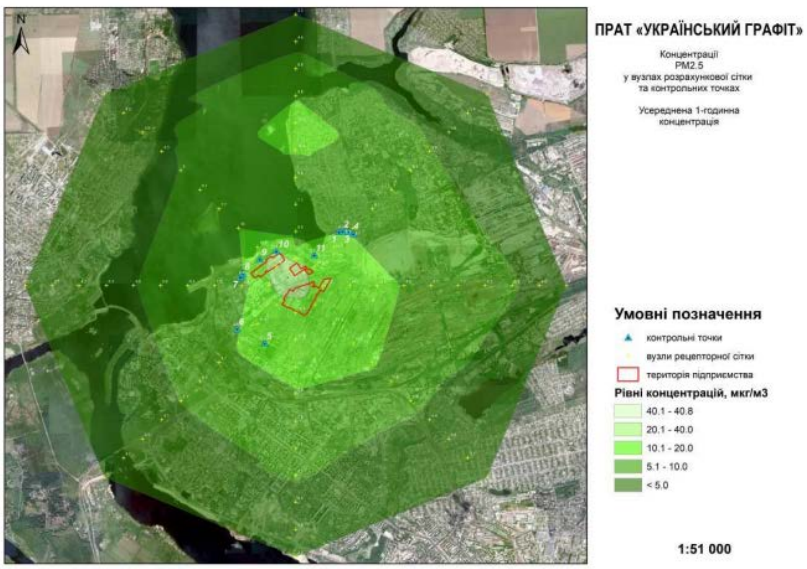


Рис. 1. *Результати розсіювання усереднених 1-годинних концентрацій $PM_{2.5}$ у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки*

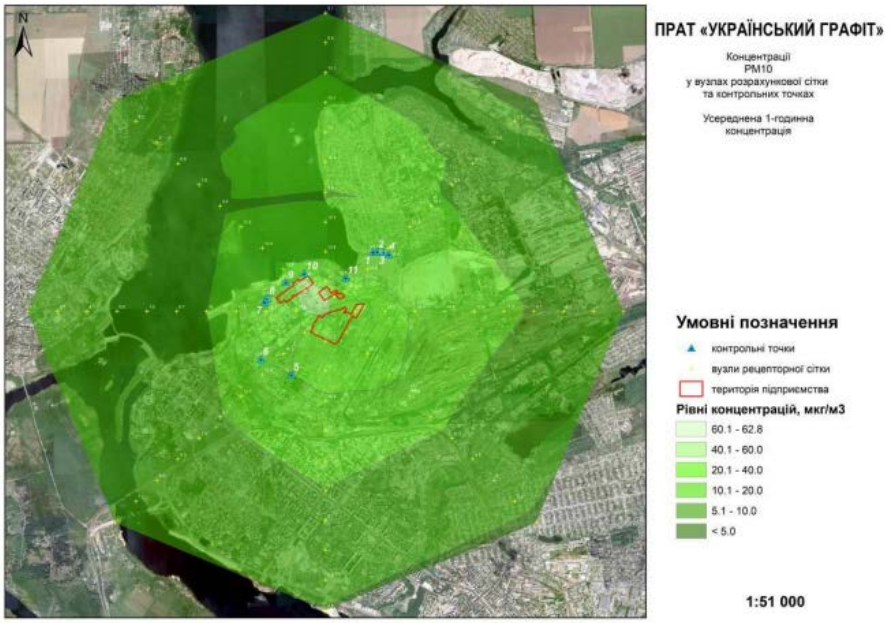


Рис. 2. *Результати розсіювання усереднених 1-годинних концентрацій PM_{10} у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки*

Таблиця 1. Рівні сумарного неканцерогенного ризику для здоров'я населення гострому та хронічному інгаляційному впливах забруднюючих речовин, що викидають стаціонарні джерела ПрАТ «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ»

Вплив	Напрям	500 м	1000 м	1500 м	2000 м	2500 м	3000 м	3500 м	4000 м	4500 м	5000 м
Гострий	пн	**1,05**	0,70	0,55	0,46	0,41	0,35	0,29	0,25	0,22	0,20
	пн-сх	**1,01**	0,92	0,69	0,51	0,42	0,36	0,31	0,27	0,26	0,24
	сх	**1,02**	0,75	0,56	0,42	0,34	0,29	0,26	0,24	0,21	0,19
	пд-сх	**1,48**	0,95	0,63	0,44	0,33	0,26	0,20	0,18	0,16	0,14
	пд	**1,37**	0,87	0,53	0,37	0,28	0,22	0,18	0,16	0,13	0,11
	пд-зх	**1,33**	0,77	0,48	0,35	0,29	0,23	0,19	0,16	0,13	0,12
	зх	0,89	0,67	0,51	0,40	0,33	0,28	0,24	0,22	0,20	0,17
	пн-зх	0,93	0,95	0,57	0,43	0,36	0,31	0,27	0,25	0,25	0,22
Хронічний	пн	0,43	0,18	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	пн-сх	0,45	0,21	0,13	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	сх	0,60	0,25	0,14	0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	пд-сх	0,89	0,33	0,17	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	пд	0,84	0,30	0,16	0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	пд-зх	0,63	0,25	0,14	0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	зх	0,37	0,20	0,13	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	пн-зх	0,62	0,16	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Таким чином, перевищення мінімального рівня сумарного неканцерогенного ризику (HI) від викидів суспендованих твердих часток у вузлах рецепторної сітки та контрольних точках за умови гострого інгаляційного впливу спостерігаються на відстані 500 м (в межах санітарно-

захисної зони підприємства) в усіх напрямках, окрім західного та північно-західного напрямків (HI=1,01÷1,48) дана територія є промзоною та вільна від забудови.

Для ефективного зниження екологічних ризиків ПрАТ «Укрграфіт» необхідне впровадження інтегрованої стратегії, яка поєднує технічні вдосконалення з належною організацією виробничих процесів і екологічного менеджменту. Одним із ключових кроків є модернізація газоочисного обладнання – встановлення високоефективних рукавних та електрофільтрів, дозволить значно зменшити викиди твердих часток у атмосферу.

Не менш важливо впроваджувати автоматизовану систему екологічного моніторингу, яка охоплює розширення мережі постів безперервного контролю якості повітря, а також централізований збір і аналіз даних. Інтеграція такої системи в загальнодержавну екологічну інфраструктуру забезпечить своєчасне виявлення потенційних екологічних загроз, оперативне реагування на надзвичайні ситуації та підвищить рівень екологічної прозорості підприємства.

Література

1. U.S. Environmental Protection Agency. The impact of PM2.5 pollution on respiratory diseases. URL: https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm

2. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

3. Турос О.І., Маремуха Т.П., Петросян А.А., Брезіцька Н.В. Дослідження забруднення атмосферного повітря зваженими частинками пилу (PM10 та PM2,5) у м. Києві // Довкілля та здоров`я. 2018. №4(89). С. 36-39

4. Маремуха Т.П. Гігієнічна оцінка забруднення атмосферного повітря теплоенергетичними об'єктами: автореф. дис. канд. мед. наук : 14.02.01 – Гігієна та професійна патологія. К., 2021. 22 с.

5. Турос О.І., Петросян А.А., Маремуха Т.П., Моргульова В.В., Михіна Л.І., Брезіцька Н.В., Давиденко Г.М., Кобзаренко І.В., Сидоренко О.О, Царенок Т.В., Мазур В.О., Бондаренко О.М., Шарай Т.Г. 2023. Звіт про наукову-дослідну роботу «Оцінка ризику для здоров'я населення, обумовленого забрудненням атмосферного повітря викидами стаціонарних джерел ПРИВАТНОГО АКЦІОНЕРНОГО ТОВАРИСТВА «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ». ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМНУ». Том 1 (Лист 2023), 141.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF PJSC "UKRGRAPHITE" DURING THE MILITARY CONFLICT

Andrii VAHIN
PJSC "UKRGRAPHITE"
Pivnichne shose, 20, Zaporizka obl., m. Zaporizhzhia, 69006, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-1234-0753

Olena IVANENKO
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Prospekt Beresteiskyi, 37, m. Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6838-5400

Yevgen PANOV
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Prospekt Beresteiskyi, 37, m. Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4885-2777

Artem MARTYNIUK
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Prospekt Beresteiskyi, 37, m. Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-0822-2092

Abstract

Industrial enterprises are one of the key sources of anthropogenic environmental impact, causing complex pollution of air, water and soil. One of the most significant sources of industrial emissions in Ukraine is PJSC "UKRGRAPHITE", a company that produces graphitized products, including electrodes, which are widely used in the metallurgical industry. During the armed conflict, environmental challenges have increased significantly due to the disruption of the state environmental monitoring system, the destruction of environmental infrastructure, reduced funding for environmental protection measures, and a general decline in the effectiveness of environmental management.

Key words: environmental safety, industrial enterprises, sustainable development, gas cleaning systems, environmental monitoring, total non-carcinogenic risk.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331926

ENHANCING NATIONAL ENVIRONMENTAL SAFETY BY REPLACING TRADITIONAL VEHICLES WITH ELECTRIC CARS

Valeriia VEMBER, Tetyana SHABLIY, Olena HLUSHKO, Tymur BERLYM
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: vvember@gmail.com

Abstract

The present study examines the environmental safety and sustainability benefits that can be achieved through the nationwide replacement of internal combustion engine vehicles (ICEVs) with battery electric vehicles (BEVs). A comprehensive life-cycle assessment (LCA) of BEVs is provided, covering the stages of raw material extraction, manufacturing, use, and end-of-life management. Key advantages of electrically powered vehicles are considered in the context of climate change mitigation, as BEVs emit approximately 50 % fewer greenhouse gases (GHGs) compared to their ICEV counterparts, with further reductions expected as electricity grids undergo decarbonization. Human health benefits include significant improvements in urban air quality due to zero tailpipe emissions and a reduction in noise pollution at low-speed operating conditions. The paper also assesses ecosystem impacts, noting that the shift in pollutant emissions during the BEV use phase — from tailpipes to power plants — generally results in net environmental gains. However, coal-dependent electricity generation may increase environmental toxicity and freshwater eutrophication. Circular economy strategies — such as battery reuse, material recycling, and sustainability-oriented product design — have the potential to significantly mitigate BEVs' environmental footprint. Integrating renewable energy sources for charging infrastructure, in conjunction with circular approaches, maximizes the potential for enhancing environmental safety through BEV adoption. Consequently, replacing ICEVs with BEVs can substantially reduce national environmental risks associated with the transport sector, provided that supportive policy frameworks ensure access to clean electricity and robust recycling infrastructure.

Keywords: *electric vehicles, life-cycle assessment, decarbonization, batteries, greenhouse gases, environmental safety, circular economy.*

Introduction

Battery electric vehicles (BEVs) are widely recognized for their potential to reduce the transport sector's environmental footprint. The EU's 7th Environment Action Programme envisions a circular economy with "nothing wasted" and transport emitting far lower greenhouse gases (GHG) and pollutants [1]. Replacing internal combustion engine vehicles (ICEVs) with BEVs can greatly diminish air pollutant emissions and noise in cities, and significantly cut life-cycle GHG emissions, thus advancing environmental safety and sustainability [1-2].

This paper goal is to provide a comprehensive, data-driven account of how electrifying the vehicle fleet enhances environmental safety and supports sustainability objectives.

Life-Cycle Environmental Impacts

Raw Materials Extraction

The BEV supply chain begins with mining and processing raw materials. BEVs require substantially more of certain materials (e.g. copper, aluminum, rare-earth metals) than ICEVs [3-4]. For example, BEVs use roughly four times more copper on average than a comparable ICEV [1]. Production of battery-grade materials (lithium, cobalt, nickel, graphite, etc.) is energy-intensive and polluting. Large volumes of energy and water are consumed, and emissions of CO_2 and toxic pollutants are released during mining and refining [4]. Metallurgical processes emit air pollutants (SO_2, NO_x, particulates) and heavy metals; mining disturbs land and risks soil/water contamination [4, 5].

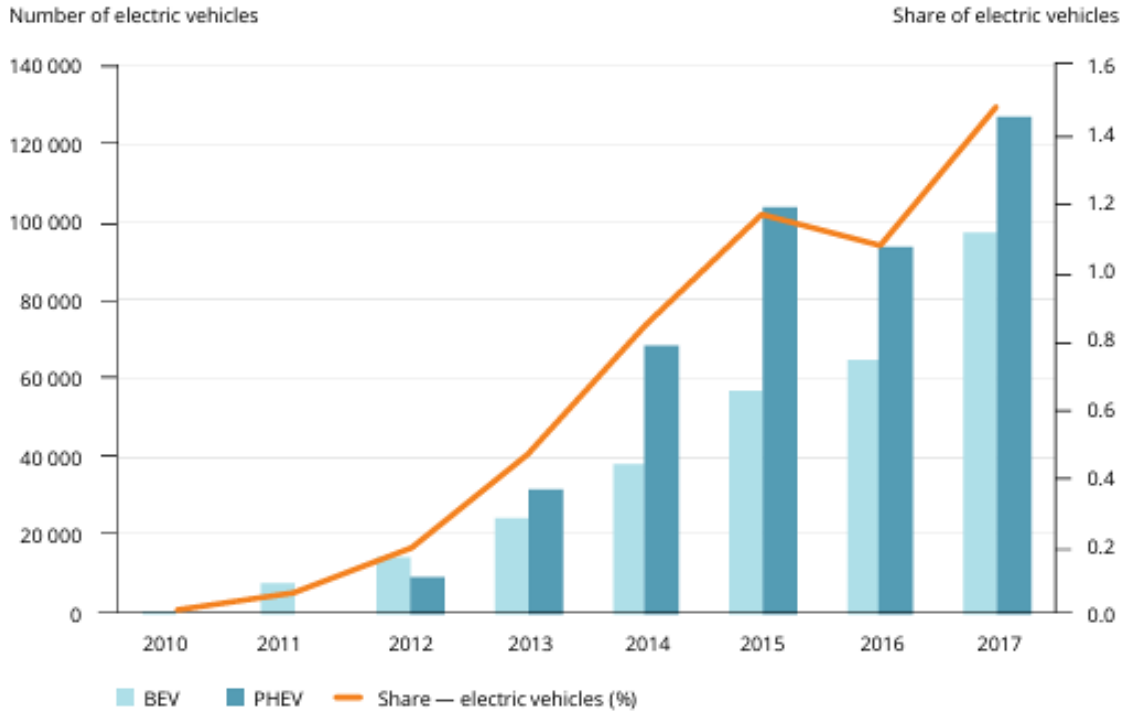


Figure 1. *Trends in the uptake of electric vehicles in the EU-28 over time [1]*

The depletion of scarce critical raw materials (CRMs) and rare earth elements (REEs) exacerbates these impacts by focusing extraction in regions with weaker environmental safeguards [6]. Consequently, BEVs' raw-material stage can have relatively higher GHG and toxicity impacts per vehicle than ICEVs [2, 7]. However, these up-front burdens are more than offset during the use phase by the absence of tailpipe emissions [2].

In summary, raw material extraction for BEVs carries substantial energy use, GHG emissions and ecological disturbance. Although raw-material impacts are important, they must be balanced against BEVs' downstream benefits. Mitigating these impacts calls for circular strategies (reuse, recycling, substitution) to reduce dependence on virgin materials [8].

Production (Manufacturing) Phase

BEV production emits more GHG and pollutants per vehicle than ICEV production, largely because of battery manufacture [9-11]. BEV manufacturing is electricity-intensive: most GHG emissions in the production phase come from powering factories and processing materials [11]. In particular, the battery pack dominates: studies find that Li-ion battery production often accounts for 30-50 % (or more) of a BEV's total production emissions [9, 10]. Depending on battery type and supply chain, *all* stages of battery production (from raw material processing to cell assembly) can contribute a large fraction of BEV manufacturing impacts [11].

Despite the higher initial impacts, these investment costs pay off over the vehicle's lifetime. For example, a medium-size BEV produced using the 2015 EU electricity mix emitted 60-76 gCO_2e per km driven, compared to ~143 gCO_2e/km for a similar ICEV in 2015, achieving ~50 % lower lifetime GHG use-phase emissions. Thus, even though BEV assembly has a higher carbon footprint, the life-cycle (production + use) typically favors BEVs under current and projected electricity mixes [2, 9]. Moreover, design choices (lighter materials, higher efficiency electronics) can reduce production impacts (using aluminum, carbon composites) [10].

Use-Phase Impacts

Climate Change Mitigation

The core climate benefit of BEVs is that they emit no CO_2 or other GHGs at the tailpipe. Emissions occur only upstream in electricity generation. When charged from a typical EU grid (2015 mix), a mid-sized BEV's well-to-wheel (WTW) CO_2 emissions were only 60-76 gCO_2e/km, versus 143 gCO_2e/km for the average ICE car at that time. This ~47-58 % reduction already means substantial climate mitigation [12].

Moreover, as the power sector decarbonizes, BEVs' advantage grows. The carbon intensity of the EU grid is projected to decrease from ~300 gCO_2e/kWh (2015) to ~80 gCO_2e/kWh by 2050 [13]. Accordingly, a typical BEV's emissions would drop from ~60 gCO_2e/km today to ~16 gCO_2e/km by 2050 (a 73 % reduction) [14]. In contrast, ICEVs have an upper bound set by combustion chemistry (around 250-300 gCO_2e/km even with advanced engines). Scenario analysis indicates that using low-carbon electricity (e.g. wind, nuclear) could make BEV lifetime emissions up to ~90 % lower than ICEVs, whereas charging from coal-fired grids can even invert the benefit [2].

Local Air Quality and Human Health

Replacing ICEVs with BEVs yields clear local air quality benefits. ICE cars emit NO_x, SO_2, CO and particulate matter (PM) at the tailpipe, whereas BEVs have zero exhaust emissions. This eliminates urban hotspots of NO_2 and PM10/2.5 from vehicles.

BEVs do still produce some particulates from tire and brake wear (and road dust resuspension) [15]. However, studies find that eliminating tailpipe PM and NOx usually outweighs this, especially since nonexhaust emissions (from tires/brakes) are similar for all vehicles. An important factor is the location of emissions: electric power plants are often sited away from dense population centers, so any pollution from electricity generation (like a coal plant) occurs outside urban airsheds. This advantage will grow as the electricity mix cleans up: as coal and oil generation fall, the net air quality benefit of BEVs will only increase [16].

Overall, BEVs significantly reduce population exposure to NO_2, CO and primary PM. This yields human health improvements (fewer respiratory and cardiovascular problems) and less ecological damage from acidification and eutrophication. International studies concur that electrification yields

large local air quality gains [15]. The net effect is improved environmental safety – cleaner cities and healthier people – as long as the power sector is managed to minimize harmful emissions.

Noise Pollution

Electric motors run much more quietly than internal combustion engines. At low speeds in urban traffic, BEVs generate substantially less noise. The literature finds that "difference in noise emissions between BEVs and ICEVs strongly depends on vehicle speed" [17]. In stop-and-go city traffic or pedestrian areas, EVs can reduce noise annoyance by ~2-3 dB, which is noticeable at street level [18]. A mixed fleet of BEVs results in lower overall urban noise exposure for residents [17]. However, at higher speeds (above 30-40 km/h), tire and aerodynamic noise dominate, so EV and ICE cars are similarly loud. Real-world studies show that BEVs on highways are only marginally quieter than modern diesel cars [19]. In summary, BEVs contribute to traffic noise reduction mainly in urban low-speed conditions, improving comfort and reducing stress. The overall effect supports public health (better sleep, less annoyance), although acoustic alert systems may be needed for pedestrian safety.

Ecosystem and Other Impacts

The life-cycle impacts on ecosystems depend on both vehicles' emissions to air, water and soil. BEV usage indirectly affects ecosystems via power generation, mining and material processing, whereas ICEVs affect them via tailpipe and fuel production emissions. Figure 4 compares the use-stage impacts on several ecosystem categories. Terrestrial acidification is about equal between BEVs and ICEVs, because BEVs eliminate NOx emissions but ICEVs eliminate SO_2 from power plants - the net acidifying output is similar [18]. Terrestrial ecotoxicity (soil impacts) is also comparable, since it is largely driven by tire and brake metal wear (zinc, copper, etc.) which occur with any car [20].

However, BEVs show higher freshwater eutrophication and freshwater ecotoxicity impacts than ICEVs [1]. This counterintuitive result arises because mining and burning coal (for electricity) releases nutrients and metals into water bodies. In other words, coal-powered charging shifts some pollution to rivers and lakes. Reducing the use of coal for electricity generation would significantly reduce these impacts of BEVs [1]. In a greener grid scenario, BEVs would likely outperform ICEVs in almost all ecosystem categories. Other ecosystem effects not fully covered by Figure 2 include land use (mining footprint) and water use (for cooling power plants). Reducing these impacts requires stronger regulations on mining and continued power sector transformation.

In summary, BEVs dramatically improve air quality and reduce noise (urban health benefits) and cut lifecycle GHG. They impose some additional burdens (mining impacts, water pollutant emissions from power plants, battery toxicity). Nevertheless, most models show BEVs reduce overall air pollution and climate forcing relative to ICEVs [1, 18].

End-of-Life (EOL) and Circular Economy

At end-of-life, EV components must be managed safely. The large Li-ion batteries in BEVs contain metals and electrolytes that require careful handling. Current vehicle recycling practices must adapt to electric drivetrain specifics (e.g. more aluminum, rare-earth magnets in motors) [21]. Reuse and recycling of EV batteries and materials is crucial [9, 22]. Figure 3 illustrates the various EOL options for batteries: direct reuse in vehicles, cascaded reuse in stationary storage, remanufacturing, and material recycling (pyrometallurgy or hydrometallurgy). Each approach preserves value and reduces virgin material demand.

Circular economy strategies can significantly mitigate EV environmental impacts. For example, reusing a second-life battery in renewable energy storage avoids manufacturing a new pack, saving

raw materials and energy [23]. Studies show that cascading one BEV battery in stationary storage can offset the production of ~11 new batteries (18 kWh each) [1]. Recycling recovers key metals (cobalt, nickel, copper, lithium, rare earths) that would otherwise require new mining. Table 1 summarizes common recycling processes: pyrometallurgy (smelting) and hydrometallurgy (leaching) can recover most battery metals [24]. A number of works note that *by 2021 more than 1/3 of the EU's cobalt demand could come from battery recycling*, though much supply still needs primary mining [25].

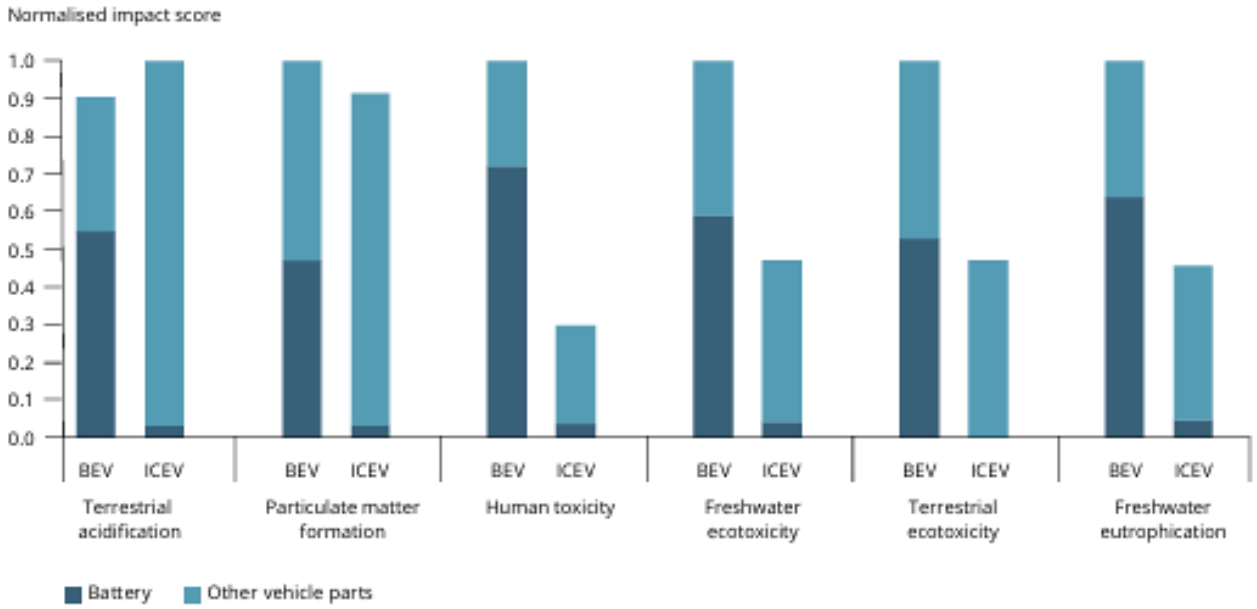


Figure 2. *Use-stage ecosystem impacts of BEVs* vs *ICEVs [1]*

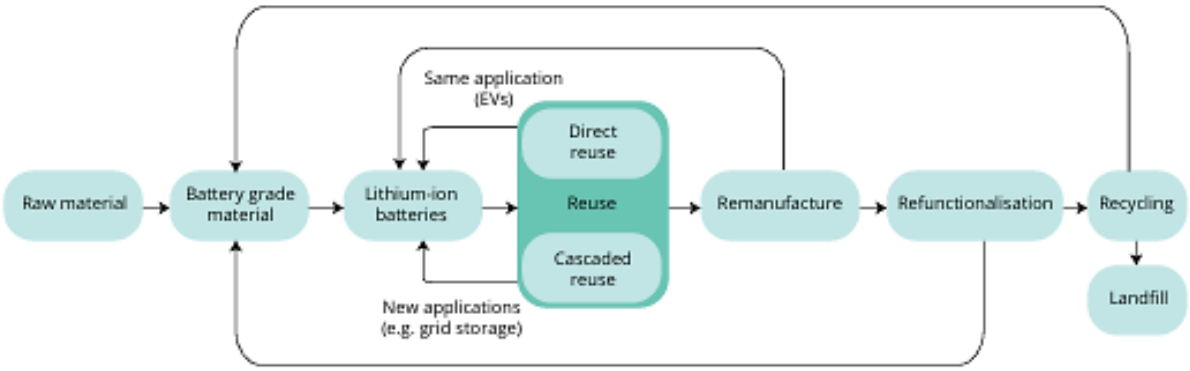


Figure 3. *Battery end-of-life pathways (adapted from Richa et al., 2017)*

Moreover, circular principles apply to vehicle design. For instance, using fewer rare-earth magnets in motors or replacing cobalt in cathodes with less-critical materials could preempt supply risks. Standardizing battery sizes and modules would facilitate remanufacturing and reuse. Overall, the combination of reuse, refurbishing, and recycling creates a closed loop: materials from end-of-life BEVs are fed back into new vehicles, dramatically reducing new extraction and energy use [21, 25].

In sum, the transition to BEVs brings inherently lower use-phase emissions, but also calls for circular economy solutions to address raw-material impacts. Employing these strategies will further

enhance environmental safety: fewer toxic wastes, less mining footprint, and conservation of natural capital.

Table 1

Recycling process	Main processing steps	Recovered materials
Pyrometallurgy	Heating, smelting and refining	Cobalt, nickel, copper (oxidised), some iron
Pyrolysis	Shredding and smelting	Nickel, cobalt, copper
Hydrometallurgy	Hammer mill, leaching, purification and metal recovery	Copper, aluminium, cobalt, lithium carbonate

Conclusion

This in-depth review confirms that replacing ICE vehicles with BEVs significantly enhances national environmental safety. The life-cycle assessment shows that BEVs typically have higher upstream impacts (mining, production), but these are greatly outweighed by much lower use-phase emissions. With a modern European grid, BEVs emit roughly half the CO2 of ICE counterparts, and this gap will widen as power generation decarbonizes [12, 14]. Importantly, BEVs cut local air pollutants at the point of use, markedly improving urban air quality and reducing health risks [1]. Noise pollution is also reduced in city traffic. While BEVs do involve intensive mineral extraction, implementing circular economy measures (battery reuse, high recycling rates, design for low material use) can substantially mitigate these supply-chain impacts [24]. Our analysis highlights that realizing the full safety benefits requires clean electricity and strong recycling infrastructure. In sum, the shift to electric passenger cars is a crucial step toward a cleaner, safer environment, providing climate, health and ecosystem gains when combined with supportive policies on energy and materials management.

References

1. *European Environment Agency (EEA),* Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives - TERM 2018, *EEA Report No 13/2018, 22 Nov 2018.*
2. Klöckner, C. A., et al., 2013, 'Positive and negative spillover effects from electric car purchase to car use', Transportation Research Part D: Transport and Environment 21, pp. 32-38.
3. Hawkins, T.R., et al. (2013), *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles,* J. Ind. Ecol. 17(1): 53-64. (On raw-material and production burdens.
4. Massari, S. and Ruberti, M., 2013, 'Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies', Resources Policy 38, pp. 36-43.
5. Pavel, C., et al., 2016, Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies: lighting, wind turbines and electric vehicles, European Commission.
6. Öko-Institut, 2018, Ensuring a sustainable supply of raw materials for electric vehicles: a synthesis paper on raw material needs for batteries and fuel cells, Öko-Institut, Berlin.
7. EC, 2017, From E-mobility to recycling: the virtuous loop of electric vehicle (https://ec.europa.eu/research/ innovation-deals/index.cfm?pg=emobility) accessed 4 April 2018.
8. EC, 2018, Report on critical raw materials and the circular economy, European Commission (https:// ec.europa.eu/docsroom/documents/27327) accessed 8 June 2018.
9. Kim, H. C., et al., 2016, 'Cradle-to-gate emissions from a commercial electric vehicle Li-ion battery: a comparative analysis', Environmental Science and Technology 50(14), pp. 7715-7722.

10. Mayyas, A., et al., 2017, 'Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective', Journal of Cleaner Production 167, pp. 687-701.

11. Ellingsen, L. and Hung, C., 2018, Research for TRAN committee — resources, energy, and lifecycle greenhouse gas emission aspects of electric vehicles, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, European Parliament, Brussels.

12. European Commission (2017), *Reducing CO_2 emissions from new cars,* COM (2017) 676 final.

13. Kim, H. C. and Wallington, T. J., 2013, 'Life-cycle energy and greenhouse gas emission benefits of lightweighting in automobiles: review and harmonization', Environmental Science and Technology 47(12), pp. 6089-6097.

14. Bussmann, N., et al. (2017), *Electric cars: driving around climate targets*. Int. Council on Clean Transportation. (General EV impacts, consistent with EEA findings).

15. Öko-Institut & Transport & Mobility Leuven (2016), *Future impacts of electric vehicles on energy and environment.* Commissioned report, 2016. (Referenced on air quality benefits.

16. Moro, A. and Lonza, L., 2017, 'Electricity carbon intensity in European Member States: impacts on GHG emissions of electric vehicles', Transportation Research Part D: Transport and Environment (https://doi.org/10.1016/j. trd.2017.07.012) accessed 15 May 2018. *Ambulation of road traffic noise,* RIVM report.

17. RIVM, 2010, Effect of electric cars on traffic noise and safety, National Institute for Public Health and the Environment (Netherlands).

18. Hooftman, N., et al., 2016, 'Environmental analysis of petrol, diesel and electric passenger cars in a Belgian urban setting', Energies 9(2), p. 84.

19. Blanes, I., et al. (2016), *Noise Environmental Burden,* European Environment Agency, EEA Report No 12/2016.

20. Ahmadi, L., et al., 2017, 'A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems', International Journal of Life Cycle Assessment 22, pp. 111-124.

21. Richa, K., et al., 2017, 'Eco-efficiency analysis of a lithium-ion battery waste hierarchy inspired by circular economy', Journal of Industrial Ecology 21, pp. 715-730.

22. Jiao, N. and Evans, S., 2016, 'Business models for sustainability: the case of second-life electric vehicle batteries', Procedia CIRP 40, pp. 250-255.

23. Kushnir, D., 2015, Lithium-ion battery recycling technology 2015. Current state and future prospects (http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/230991/local_230991.pdf) accessed 4 May 2018

24. Romare, M. and Dahllöf, L., 2017, The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium ion batteries, IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm

ПІДВИЩЕННЯ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ШЛЯХОМ ЗАМІНИ ТРАДИЦІЙНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯМИ

Валерія ВЕМБЕР
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-0790-5350

Тетяна ШАБЛІЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3454-675X

Олена ГЛУШКО
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-8243-5707

Тимур БЕРЛИМ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна
https://orcid.org/0009-0004-1869-7907

Анотація

У цьому дослідженні розглядаються переваги екологічної безпеки та сталого розвитку, які можуть бути досягнуті шляхом заміни транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) на акумуляторні електромобілі (БЕМ) у національному масштабі. Надається комплексна оцінка життєвого циклу БЕМ, що охоплює етапи видобутку сировини, виробництва, використання та завершення терміну служби. Ключові переваги електромобілів з електричним живленням розглядаються з точки зору пом'якшення зміни клімату, оскільки БЕМ викидають приблизно вдвічі менше парникових газів, ніж аналогічні ДВЗ, з подальшим їх скороченням в разі декарбонізації мереж. Переваги для здоров'я людини включають значне покращення якості міського повітря завдяки нульовим викидам вихлопних газів та зменшенню шумового забруднення в умовах низьких швидкостей. У роботі також аналізується вплив на екосистеми: зазначається, що перенесення забруднюючих речовин на стадії використання БЕМ — від вихлопних газів до електростанцій — зазвичай призводить до чистих екологічних вигод, хоча електроенергія, що залежить від вугілля, може підвищити токсичні впливи на довкілля та рівень еутрофікації водойм. Стратегії циркулярної економіки — повторне використання акумуляторів, переробка матеріалів та проєктування з урахуванням сталого розвитку — можуть значно пом'якшити вплив електромобілів на навколишнє середовище. Комплексне використання відновлюваної енергії для заряджання разом з циркулярними підходами максимізує можливості зміцнення екологічної безпеки від впровадження електромобілів. Отже, заміна транспортних засобів з ДВЗ на БЕМ суттєво знижує національні екологічні ризики від транспорту, за умови, що підтримуюча політика забезпечує чисту електроенергію та надійну інфраструктуру переробки.

Ключові слова: електромобілі, життєвий цикл, декарбонізація, акумуляторні батареї, парникові гази, екологічна безпека, циркулярна економіка.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332912

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION RESULTING FROM THE DESTRUCTION OF CIVILIAN PETROLEUM STORAGE FACILITIES DURING MILITARY OPERATIONS

Ruslan HAVRYLIUK[1], Yevhen NASIEDKIN[1], Olha LOHVYNENKO[1], Ganna IVANOVA[1], Gintaras ŽARŽOJUS[2], Vytautas SAMALAVIČIUS[2], Ieva LEKSTUTYTĖ[2]
[1]Institute of Geological Sciences of National Academy of Sciences of Ukraine
O. Gonchara 55-B str., 01054 Kyiv, Ukraine
[2]Institute of Geosciences at Vilnius University
Čiurlionio str. 21/27, LT-03101, Vilnius, Lithuania
e-mail: a_1207@ukr.net

Abstract

The publication examines a topical issue related to the impact of military actions on the state of one of the fundamental components of the environment – the soil layer both within the aeration zone and the collectors of the first aquifers from the surface. The massive destruction of oil processing and storage facilities in Ukraine caused by Russian aggression, not only on the battle lines but also deep in the rear, creates a significant long-term danger to environmental components and human economic activity. At one of the technogenic disaster sites destroyed by Russian missiles (oil depot in urban settlement Kalynovka, Kyiv region) specialists from the IGS of NAS of Ukraine have begun practical and theoretical work to create a methodological basis for assessing the impact of pollution on the environment and develop measures to minimize such impact.

Key words: *impact of military operations, soils, petroleum products, environmental damage, assessment methodology, groundwater.*

It is well known that one of the most vulnerable components of the environment in the area of military activity was and remains the soil, as evidenced by daily illustrations from the theaters of military operations of the Russian-Ukrainian war. In addition to the visually recorded impact on the fertile layer (violation of the integrity of the soil and vegetation cover, pollution with hazardous substances, etc.), there are other dangerous aspects, the negative effects of which have a hidden or delayed effect. They can not only manifest and have a long-term impact after a certain time, but also change the location and type of impact on various components of the environment, which is difficult to predict.

We are talking about leaks of significant volumes of liquid pollutants, in particular petroleum products, which enter the soil not only during military operations, but also as a result of missile/UAV strikes on civilian infrastructure facilities deep in the rear [1]. In addition to contamination of the fertile soil layer there is a risk of oil products leaking deep into the soil layer and entering underground horizons. In accordance with the geological and hydrogeological conditions of the territories and the

physicochemical properties of pollutants, their accumulation occurs on the surface of groundwater and water-resistant layers of rocks. This causes complex negative consequences, including contamination of underground aquifers and migration ("spreading") of the liquid phase of pollutants over large areas. And this, in accordance with the geomorphological conditions of the area, can lead to the discharge of pollutant flows into surface water reservoirs and the creation of long-term problems for aquatic organisms, drinking water intakes, and irrigation areas.

Solving of such problems requires significant expenditure on localizing pollution and developing measures to minimize/remove it, and first of all, on carrying out research on the diagnostics of polluted environments, their properties in interaction with pollutants, concentrations of accumulated pollutants, and forecasts of impact on the environment.

In the pre-war period research team of IGS of NAS of Ukraine investigated the consequences of the impact of military and civilian activities on the environment, in particular, such objects as military airfields and oil depots, as well as civilian airports [2]. For such objects, an assessment of the state of pollution of the geological environment was carried out (Fig. 1), sources and routes of pollution distribution were identified, geofiltration mathematical models were created, the impact on adjacent components of the environment was determined, and recommendations for the management of contaminated areas were developed. The developed scientific approaches allow us to perform high-quality similar work on pollution hotspots that appeared as a result of Russian aggression.

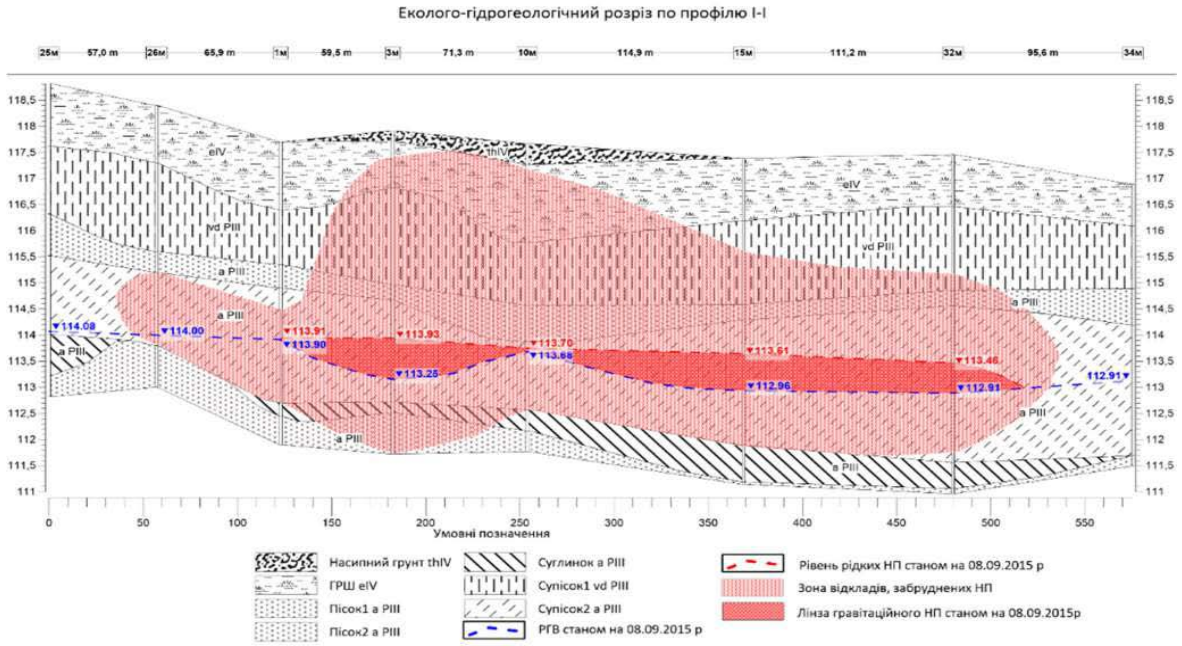


Figure 1. *Example of a schematic model of liquid petroleum product migration through different strata of the geological cross-section (fuel and lubricants storage area, Boryspil Airport)*

The development of a methodological framework for assessing the consequences of petroleum contamination in the geological environment, based on practical experience [3], can significantly reduce the time and financial costs associated with such assessments. Given the large number of facilities destroyed by Russian forces and the limited resources available in Ukraine for environmental research, this will have a notably positive impact

One of the most serious incidents occurred near the village of Kalynivka (Kyiv region), where a missile attack destroyed large fuel tanks (Fig. 2), leading to uncontrolled leakage of petroleum products into the soil and groundwater. The pollution has spread to the local river system, affecting

tributaries of the Irpin River and creating long-term risks to ecosystems, water resources, and human health.

Figure 2: *Civilian oil depot destroyed by a Russian missile attack Kalynivka urban settlement, Fastiv district of the Kyiv region)*

The situation was worsened by the destruction of the concrete protective cushion at the site of the tanks and the protective concrete barrier around their perimeter. As a result, petroleum products entered the soil at the oil depot site and spread to nearby areas.

Figure 3. *Documented contamination of the geological environment in the area of the destroyed oil depot based on drilling results*

The first field studies in the area of the destroyed oil depot showed the formation of a zone of intensive contamination of the geological environment with liquid petroleum products along the river bank (Fig. 3).

It is assumed that oil products could have entered the river from the site of the destroyed oil depot as a result of rapid overflow through the underground structures of the drainage system. The river is part of the cascade of water bodies of Kozhukhivka village and belongs to the Irpin River basin. Large-scale pollution of the river during 2022-2025 did not decrease in intensity. In the near future, in the absence of nature restoration measures, this will affect not only the ecosystem of the river and the adjacent territory, but also the environmental objects and economic activities downstream.

We are determining the degree and spatial distribution of hydrocarbons contamination of the geological environment (soil, groundwater, bottom sediments of adjacent surface water ponds) (Fig. 4). Planning of further field work will be based on the need to forecast the spread of pollution from the site of the petroleum products leak in the geological environment and assess the risks of impact on the social sphere (water intakes, surface water ponds for various economic purposes) and biotic groups of nearby natural reserve fund objects. Both the completed and planned field work consists of surveying the oil depot area, identifying pollution hotspots; sampling soils, bottom sediments of water

ponds, groundwater and surface waters to determine the content of pollutants within the designated areas, inter alia by drilling exploratory wells.

Figure 4. *Contaminated aeration zone sediments with discoloration (left) and contaminated surface waters of a small river (right), June 2024*

The laboratory studies will include comprehensive analysis of soil samples (natural properties and contamination status). The analysis of the obtained results will involve the development of a conceptual model for predicting the spread of contamination in the geological environment, including its extent and affected area.

The forecasting of contamination plume transformations using mathematical modeling will include, in particular, scenarios of petroleum product interactions within the 'water–petroleum product–soil' system, as well as a risk assessment of their impact on social and environmental assets.

Conclusions

The combination of field research and laboratory work using modern equipment, the use of mathematical models and the creation of databases within the framework of the local task will allow the formation of algorithms for approaches to assessing and solving the problem as a whole. Defining the instrumental and technological components of the research will contribute to the development of an optimal methodological framework for improving the management of petroleum-contaminated zones within the geological environment caused by Russian aggression. Conducting these studies in the scientific and practical plane will contribute to the creation of a methodological basis for working out similar centers of pollution in other locations affected by Russian aggression.

References

1. Karamushka, V., Boychenko, S., and Havryliuk, R. (2024). Environmental consequences resulted from the oil depots' deterioration by the RF's missile attacks, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-478. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-478.

2. Ognianik M.S., Bricks A.L., Havryliuk R.B. (2018). Research of groundwater contaminated by petroleum products of Ukraine. Geologičnij žurnal, 3 (364): 59–66. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.3.142272 [in Ukranian]

3. Havryliuk, R., Shpak, O., Lohvynenko, O., & Zapolskiy, I. (2024). Methodical aspects of the assessment of the state of subsurface contamination with petroleum products caused by the military aggression of the Russian Federation against Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (61), 23-38. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-02 [in Ukranian].

ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ВНАСЛІДОК РУЙНУВАННЯ ЦИВІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗБЕРІГАННЯ НАФТОПРОДУКТІВ В ХОДІ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Руслан ГАВРИЛЮК
Інститут геологічних наук НАН України
вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6465-9440.

Євген НАСЄДКІН
Інститут геологічних наук НАН України
вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2633-9291.

Ольга ЛОГВИНЕНКО
Інститут геологічних наук НАН України
вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0001-8193-4144

Ганна ІВАНОВА
Інститут геологічних наук НАН України
вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна
https://orcid.org/0000-0002-5012-1084

Гінтарас ЖАРЖОЮС
Інститут геологічних наук Вільнюського університету
Čiurlionio str. 21/27, LT-03101, Vilnius, Литва
https://orcid.org/0000-0003-2079-4680

Вітаутас САМАЛАВІЧЮС
Інститут геологічних наук Вільнюського університету
Čiurlionio str. 21/27, LT-03101, Vilnius, Литва
https://orcid.org/0000-0001-5791-7483

Іева ЛЕКСТУТИТЄ
Інститут геологічних наук Вільнюського університету
Čiurlionio str. 21/27, LT-03101, Vilnius, Литва
https://orcid.org/0000-0003-0104-0605

Анотація

В публікації розглянуто актуальне питання, пов'язане з впливом військових дій на стан одного з основоутворюючих компонентів навколишнього середовища – шару ґрунтів як в межах зони аерації так і колекторів перших від поверхні водоносних горизонтів. Масові руйнування об'єктів переробки та зберігання нафтопродуктів в Україні, спричинені російською агресією, не тільки на лініях бойового зіткнення, але й глибоко в тилу, створюють суттєву довготривалу небезпеку для складових довкілля та господарської діяльності людини. Фахівцями ІГН на базі одного з об'єктів техногенного лиха – зруйнованої ракетами росіян нафтобази в с. Калинівка Київської області, розпочато практичні та теоретичні роботи зі створення методичної бази для проведення оцінки впливу забруднення на довкілля та розробки заходів з мінімізації такого впливу.

Ключеві слова: вплив військових дій, ґрунти, нафтопродукти, шкода навколишньому середовищу, методика оцінки, ґрунтові води.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330133

ATMOSPHERIC LOAD IN THE URBAN ECOLOGICAL DIMENSION: SPATIAL ANALYSIS OF UKRAINIAN REGIONS IN 2021–2022

Viacheslav HNATIUK[1], Tetiana SHABLIY[1], Oleksandra SHABLIY[2]
[1]*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
[2]*Washington State University*
2425 Grimes Way, Pullman, WA 99164
e-mail: viacheslavhnatiuk@gmail.com

Abstract

The state of atmospheric air is one of the fundamental indicators of the quality of the urban ecological environment. The full-scale invasion that began in Ukraine in 2022 significantly altered the nature of environmental pressure: the focus shifted from traditional sources of pollution, such as industrial enterprises, to newer factors—namely, military actions, the destruction of critical infrastructure, and mass population displacement.

The comparative analysis conducted in this study enables an assessment of how atmospheric air quality in various regions has changed due to the war. The results not only document the current transformations but also provide a foundation for theoretical modeling of potential scenarios in the event of hostilities in new locations. Thus, the study may serve as a valuable tool for forecasting environmental dynamics in the context of armed conflicts.

Keywords: *air pollution, Air Pollution Index (API), waste, green zones, emergencies, urban ecological load.*

Objective – the study aims to rank the air quality across Ukrainian regions in 2021–2022 and to develop a regional Urban Ecological Load Index with a focus on the atmospheric component. **Scientific Novelty –** the research develops and tests a multifactorial integrated approach for assessing atmospheric urban ecological load in Ukrainian regions, adapted to the conditions of wartime.

Essence of the Study

In the context of increasing technogenic pressure on the environment, the assessment of urban ecological load at the regional level becomes particularly important. This study presents a comparative analysis of the environmental conditions across 24 regions of Ukraine based on an integrated approach that takes into account a set of key indicators.

The following indicators were used for the comparative analysis of Ukraine's 24 regions:

- Air Pollution Index (API).
- Number of emergencies.
- Volume of generated waste (relative coefficient).
- Actual forest cover (%).

Each of these indicators underwent normalization to ensure data comparability across regions. A distinct feature of the forest cover calculation was the use of an inverse scale: given its positive impact on environmental conditions, a higher level of forest cover was interpreted as a lower ecological load.

All indicators were normalized, after which an integrated index of atmospheric urban ecological load was calculated.

$$N = \frac{x - min(x)}{max(x) - min(x)}$$

were:
N – normalized value;
x – the measured value for the area;
min(x) – the minimum value over a given period;
max(x) – the maximum value over a given period.

An inverse scale was applied to forest cover (since a higher level of forestation corresponds to a lower ecological load):

$$N_{Forest} = 1 - \frac{x - min(x)}{max(x) - min(x)}$$

were:
N_{Forest} – normalized value for forest cover.

After normalization, all indicators were averaged, and based on them, the integral Urban Ecological Load Index I_{UEL}) was calculated using the following formula:

$$I_{UEL} = \frac{N_{API} + N_{Emergency} + N_{Waste} + N_{Forest}}{4}$$

were:
I_{UEL} – the integral Urban Ecological Load Index:
N_{API} - normalized value for air pollution index;
$N_{Emergency}$ – normalized value for quantity of emergencies;
N_{Waste} – normalized value for amount of waste generated.

This index enables the assessment of the overall level of ecological load in each region and allows for dynamic comparison. A comparative analysis was conducted for two consecutive years 2021 and 2022 which made it possible to identify both consistent trends and potential changes in the environmental conditions at the regional level. The results are visualized in the form of a chart that clearly illustrates the ecological ranking of each region.

Key Indicators

1. Air Pollution: General Trends

In 2021, the highest Air Pollution Index (API) was recorded in Ukraine's industrially developed regions—Donetsk (15.7), Dnipropetrovsk (12.8), and Odessa (12.5) oblasts. However, by 2022, a noticeable decline was observed: in Donetsk to 10.2, in Kyiv from 8.6 to 7.6, and in Kharkiv from 3.4 to 2.7.

The main reason behind this temporary improvement in air quality is the reduction of industrial activity due to ongoing hostilities in the eastern and central regions. The shutdown of factories and industrial facilities led to a decrease in emissions—an unintended yet short-term environmental effect of the war.

2. Emergencies as a Factor in Air Quality Deterioration

The oblasts with the highest number of emergencies—Kherson, Donetsk, and Mykolaiv—reported 10–11 incidents per year. Most were related to explosions, fires, and infrastructure destruction, which are direct sources of secondary atmospheric pollution. The combination of high or medium API levels with frequent emergencies indicates persistent urban ecological stress in these territories.

3. Waste: Industrial Legacy and Its Impact

Donetsk and Dnipropetrovsk oblasts top the anti-rating in terms of waste generation—over 23 million tons annually, mostly industrial waste of hazard classes I–II. The API in these regions clearly correlates with the accumulation of hazardous waste, especially in areas of intense industrial activity.

In contrast, western regions—Chernivtsi, Ivano-Frankivsk, and Zakarpattia—have low API levels and low volumes of generated waste. This confirms a direct relationship between industrial load and air quality.

4. Ukraine's Green Shields: Forest Cover as an Ecological Buffer

Forest cover emerged as a powerful natural factor capable of mitigating atmospheric pollution. Zakarpattia, Ivano-Frankivsk, and Volyn oblasts, each with over 40% forested area, show the lowest API values.

Conversely, oblasts with the lowest forest cover—Kherson, Zaporizhzhia, and Dnipropetrovsk (less than 10%)—face the highest pollution levels. This confirms that forests serve not only as landscape elements but also as critical buffers capable of absorbing harmful substances and reducing environmental pressure.

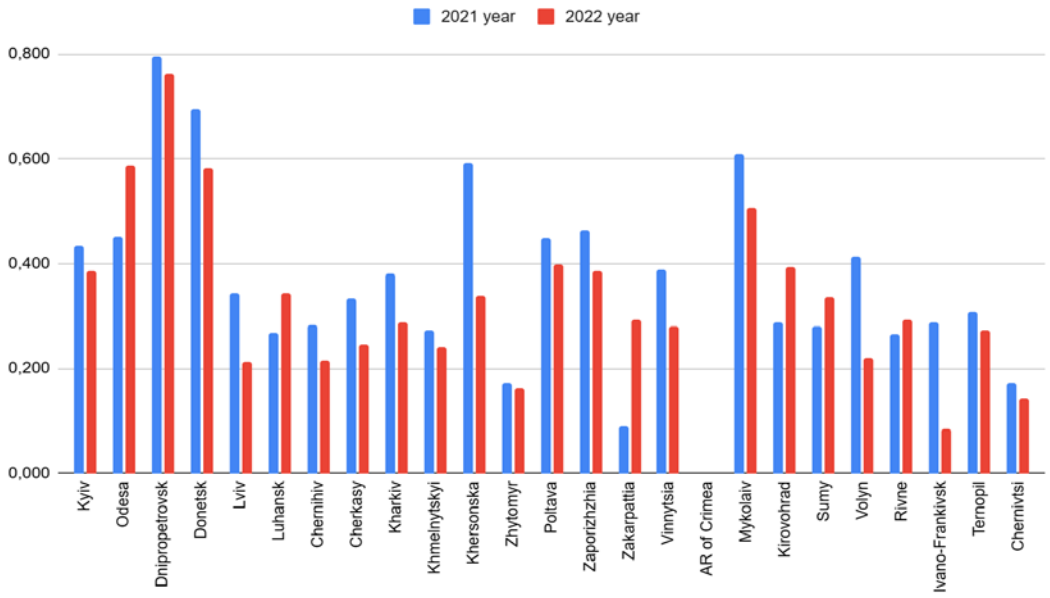


***Fig. 1**. Urban Ecological Load Index across All Regions of Ukraine*

Conclusions

- The Integral Urban Ecological Load Index (UELI) is an effective aggregated indicator for assessing the environmental condition of Ukraine's regions. It accounts for the most significant components of urban ecological pressure—air pollution, emergencies, waste generation, and forest cover.
- The normalization method enables comparison of diverse ecological indicators, while the use of an inverse scale for forest cover accurately reflects its protective role in shaping environmental conditions.
- The dynamics of indicators for 2021–2022 show a temporary improvement in air quality in certain industrial regions (particularly Donetsk and Kyiv oblasts), driven by a decline in industrial emissions. However, this does not suggest that military actions are harmless to the environment—this issue requires further research and recalculations.
- The combination of high pollution levels and a high number of emergencies in specific regions (Kherson, Donetsk, Mykolaiv) indicates sustained urban ecological pressure and increased environmental vulnerability to anthropogenic and technogenic impacts.
- A clear correlation exists between the level of industrialization and environmental risks—regions with large volumes of waste, especially of hazard classes I–II, simultaneously demonstrate higher API levels.
- Forest cover has proven to be a natural stabilizer of ecological balance—regions with extensive forested areas consistently exhibit lower levels of atmospheric pollution.

References

1. State Emergency Service of Ukraine. (2022). *Public report for 2022*. https://dsns.gov.ua/upload/1/6/6/4/2/7/0/an-kmu-ns-12-2022publzvit.pdf

2. State Statistics Service of Ukraine. (2022). *Population as of January 1, 2022*. https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/10/zb_nasel%20_2021.pdf
3. Opendatabot. (2023). *How many people died in Ukraine in 2022*. https://opendatabot.ua/analytics/death-2022
4. Skilky-Skilky. (2023). *Air pollution in Dnipro is twice as high as in Ukraine on average*. https://skilky-skilky.info/u-dnipri-atmosfera-u-2-razy-brudnisha-nizh-zahalom-v-ukraini/
5. Open Data Portal of Ukraine. (n.d.). *Air quality monitoring*. https://data.gov.ua/dataset/ff2a9d56-49bb-4d3b-bd5d-f60c7725da6d
6. State Forest Resources Agency of Ukraine. (2022). *Public report for 2021*. https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/%D0%BF%D1%83%D0%B1%D0%BB%D1%96%D1%87%D0%BD%D1%96%20%D0%B7%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%B8/publichniy-zvit-za-2021.pdf
7. State Forest Resources Agency of Ukraine. (2023). *Public report for 2022*. https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/publich_zvit/publichnii-zvit-za-2022.pdf

АТМОСФЕРНЕ НАВАНТАЖЕННЯ В УРБОЕКОЛОГІЧНОМУ ВИМІРІ: ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ У 2021-2022 РОКАХ

В'ячеслав ГНАТЮК
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0000-0709-0246.

Тетяна ШАБЛІЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3454-675X.

Олександра ШАБЛІЙ
Державний університет Вашингтону
2425 Grimes Way, Pullman, WA 99164, США
https://orcid.org/0000-0001-6087-2255

Анотація

Стан атмосферного повітря є одним із базових індикаторів якості урбоекологічного середовища. Повномасштабне вторгнення, що розпочалося в Україні у 2022 році, суттєво змінило характер екологічного навантаження: пріоритетними стали не стільки традиційні джерела забруднення, як-от промислові підприємства, скільки новітні чинники — бойові дії, руйнування критичної інфраструктури та масове переміщення населення.

Проведений порівняльний аналіз дозволяє оцінити, яким чином змінився стан атмосферного повітря в регіонах внаслідок воєнних подій. Отримані результати не лише фіксують поточні зміни, а й створюють основу для теоретичного моделювання можливих сценаріїв розвитку ситуації в разі початку бойових дій у нових локаціях. Таким чином, дослідження може бути корисним як інструмент прогнозування динаміки екологічного стану територій у контексті збройних конфліктів.

Ключові слова: атмосферне забруднення, ІЗА, відходи, зелені зони, надзвичайні ситуації, урбоекологічне навантаження.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331955

TOWARDS A CIRCULAR AND SUSTAINABLE UKRAINE: LIFE CYCLE ASSESSMENT PROGRESS IN POLICY, TECHNOLOGY, AND ACADEMIA

Ivan HETMAN
Linköping University
Norrköping, SE-601 74, Sweden
Clinical Department of Occupational and Environmental Medicine
Region Östergötland, SE-581 85 Linköping, Sweden
e-mail: ivan.hetman@liu.se

Abstract

This paper presents an overview of the rapid development of Life Cycle Assessment (LCA) in Ukraine as of 2025. It outlines how regulatory reforms, EU integration, post-war reconstruction, and academic efforts have accelerated the adoption of LCA in national policy, technology, and practice. Key milestones include the adoption of ISO standards, integration of LCA in public procurement and building codes, and creation of data infrastructure and expert capacity. Ukraine's journey toward sustainability is supported by LCA as a guiding methodology for green growth, emissions reduction, and circular economy development.

Key words: *Life Cycle Assessment (LCA), Sustainability Policy, Post-war Reconstruction, Ukraine, Environmental Regulation.*

Introduction

Life cycle assessment (LCA) has become a central tool for assessing the environmental impacts of products and processes, quantifying inputs, outputs and emissions at all life cycle stages to support sustainable development decision-making. Ukraine's post-war reconstruction following the unprovoked Russian invasion in 2022 highlights the importance of rebuilding infrastructure and the economy with sustainability in mind. This situation provides a strong impetus for introducing life cycle thinking into national planning. This article reviews the development of LCA in Ukraine as of spring 2025, focusing on the evolution of regulatory and policy frameworks, technological and practical innovations, academic contributions and capacity building. Particular attention is paid to convergence with European Union (EU) environmental standards and how LCA supports Ukraine's EU alignment and sustainable development goals. Key milestones are highlighted, such as new legislation on green public procurement and waste management, integrating LCA into construction and production standards, and creating LCA infrastructure. The context of Ukraine's post-war reconstruction is intertwined throughout, where the principle of "rebuild better" drives reconstruction projects to improve environmental performance and sustainability. LCA is presented as a framework that ensures long-term sustainability in the choice of reconstruction, aligning it with Ukraine's climate commitments and the EU Green Deal. Ukraine's status shapes the current development trajectory as an EU candidate country, which is driving reforms and the integration of LCA and life cycle into

policy, industry, and academia. The following sections review the political context, technological implementation, academic potential, and future challenges and prospects.

Regulatory and Policy Frameworks for LCA in Ukraine

Since the mid-2010s, Ukraine's environmental governance has undergone rapid modernization, reflecting both internal policy reforms and external alignment with the EU. A turning point occurred in 2014 with the EU-Ukraine Association Agreement, which committed Ukraine to harmonize environmental standards with EU directives [1]. This commitment initiated a sequence of reforms providing the foundation for LCA uptake.

Green Public Procurement (GPP)

Public procurement served as an early vector for life-cycle criteria. The Law of Ukraine "On Public Procurement," last updated in 2019, introduced provisions for incorporating environmental criteria into technical specifications [2]. Article 22 mandates the inclusion of energy efficiency, waste reduction, and lower greenhouse gas (GHG) emissions. This reform, in line with the EU Association Agreement, introduced life-cycle cost assessment into tenders, indirectly promoting LCA by evaluating not only upfront price but also environmental impacts. As a result, government procurement can favour products with eco-labels or superior environmental performance, encouraging suppliers to conduct LCAs to compete. Early examples include requirements for Type I eco-label certification for computers, which led to procurement of energy-efficient, low-toxicity products at no additional cost [3].

National Environmental Strategies and EU Alignment

The "Basic Principles of State Environmental Policy of Ukraine until 2030," adopted in 2019, and the National Action Plan for Environmental Protection 2021–2025, explicitly prioritize resource efficiency, recycling, and the use of lifecycle-based indicators [4]. These strategies lay the groundwork for broader LCA adoption and reinforce convergence with the EU Green Deal, which uses LCA as a foundation for product and climate policy. Ukraine's observer status in the European Green Deal, and participation in related platforms, signal intent to adopt LCA-based approaches.

Waste Management and Circular Economy Legislation

The Law "On Waste Management" (No. 2320-IX, June 2022) [5] represents a major advance, aligning Ukraine with EU Directive 2008/98/EC [6]. The law introduces the EU waste hierarchy and Extended Producer Responsibility (EPR), obliging producers to address the full life cycle of products and packaging. This shift effectively mandates lifecycle considerations, requiring companies to design for recyclability and recovery. Technical regulations on waste sorting and packaging have been updated accordingly. These reforms drive LCA use for identifying optimal waste management options and developing eco-design strategies, supporting significant increases in recycling rates and reductions in landfilling.

Integration of LCA in Construction Standards

The State Standard DSTU 9171:2021 "Guidelines for ensuring the balanced use of natural resources in the design of structures" (effective 2022) aligns with EU sustainable construction principles and requires at least 70% of materials in a building project to be recyclable or reusable. The standard introduces methods of economic and environmental LCA for buildings, requiring simplified LCA at the preliminary design stage and full LCA at detailed design. These requirements have been integrated into the building code, obliging architects and engineers to consider lifecycle carbon and energy footprints during design. This approach brings Ukraine in line with EU practices and ensures that post-war reconstruction incorporates sustainability from the outset.

Product Environmental Footprint (PEF) and Eco-Labelling

Steps have been taken to adopt the EU's Product Environmental Footprint methodology, an LCA-based approach for product environmental performance across 16 impact categories. Supported by the EU4Environment program, a PEF pilot initiative has prepared Ukrainian industries for the Single Market for Green Products [7]. A legal framework regulates environmental claims, prohibiting misuse of "eco," "bio," and "organic" labels without certification, and has harmonized many ISO 14020-series standards. While PEF is not yet mandatory, Ukrainian exporters face requirements to report product carbon footprints under measures such as the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), driving the adoption of LCA methodologies in industry [8].

Integration of ISO Life Cycle Assessment Standards

Since 2014, Ukraine's national standards body has systematically adopted ISO LCA standards, including ISO 14040:2006 (Principles and Framework) and ISO 14044:2006 (Requirements and Guidelines) as national DSTU ISO standards. Supplementary guidelines such as DSTU ISO/TR 14047:2016 and DSTU ISO/TR 14049:2016 support practical implementation, while DSTU ISO/TS 14071:2018 clarifies critical review processes. Standards for EPDs (DSTU EN ISO 14025:2022), water footprint (DSTU ISO 14046:2018), and organizational carbon accounting (DSTU ISO 14064 series) have also been adopted. The adoption of these standards supports compliance with EU Green Deal requirements and enhances the credibility of environmental claims, underpinning Ukraine's sustainability strategy.

Technological Innovations and Implementation

Robust LCA practice depends on the availability of data and analytical tools. In Ukraine, recent technological advances and support mechanisms are making LCA more accessible.

Software and Data Infrastructure

Following the war, a support program by One Click LCA in 2024 made advanced building LCA software freely available for reconstruction projects, removing financial barriers to LCA tool access [9]. This enables project teams to assess the life-cycle impacts of materials and designs for schools, hospitals, housing, and infrastructure. Material-specific environmental profiles allow comparison of design alternatives, supporting implementation of new standards such as DSTU 9171. Broader use of these tools is expected to seed longer-term adoption of LCA software in Ukraine's construction sector and beyond.

Innovative Analytical Approaches

Ukrainian researchers are adopting advanced methods such as hybrid LCA (combining process and input-output data) and applying artificial intelligence (AI) for scenario modelling. For example, hybrid LCA applied to the water sector identified major contributors to environmental impacts, providing actionable insights for policy and infrastructure upgrades [10].

Training and Knowledge Transfer

Training workshops under EU4Environment and UNIDO have equipped Ukrainian specialists with skills in LCA and PEF, using both international and Ukrainian-language materials [11][12]. Academic centres, such as the LCA Hub at Sumy State University, develop and disseminate algorithms, models, and training materials, ensuring technological advances are effectively adopted [13]. Ukraine is rapidly acquiring the technological means, software, databases, analytical techniques to support mainstream LCA practice.

Academic Contributions and Capacity Building

The development of LCA in Ukraine is underpinned by a growing academic and research base.

Centres of Excellence

The establishment of specialized research centres, notably the LCA Hub at Sumy State University, has provided a focal point for LCA problem-solving, research, and capacity building. The Hub's interdisciplinary team addresses practical issues in LCA, supports businesses and government with sustainability analysis, and promotes life-cycle thinking in education and policy. Fundamental research includes bibliometric studies, sectoral LCA applications, and analyses of carbon management and circular economy policy [14].

Research and Knowledge Dissemination

Academic studies in Ukraine have analysed the evolution and current state of LCA, with conclusions that the field remains in an "awareness-raising" phase but is advancing through increased recognition, standardization, and dissemination. Academic recommendations include strengthening knowledge exchange, creating specialized platforms, and integrating LCA into business and government decision-making.

International Collaboration

Ukrainian universities and experts participate in EU-funded projects (Horizon Europe, Erasmus+) focusing on sustainability and circular economy, often including LCA components. Joint research with European partners addresses barriers to the circular economy and links LCA findings to policy recommendations [15]. International collaborations integrate Ukraine's academic community with the global LCA network.

Education and Training

LCA has been incorporated into environmental science and engineering curricula at Ukrainian universities, and short courses and workshops, often supported by international organizations, broaden practical knowledge. The publication of Ukrainian-language LCA textbooks and courses has lowered language barriers and improved training for students and professionals.

NGOs and Professional Communities

NGOs such as "Living Planet" [16] and the Resource Efficient and Cleaner Production Centre (RECP Centre) [10] have played roles in certification, awareness-raising, and introduction of life-cycle thinking in industry. Partnerships between academia and these groups reinforce the practical application of LCA concepts.

LCA, EU Integration, and Sustainable Reconstruction

Ukraine's path toward EU integration and post-war recovery provides both a challenge and an opportunity for mainstreaming LCA. EU candidate status accelerates the adoption of environmental acquis, making life-cycle perspectives central to product, construction, and industrial policy. Implementation of an Emissions Trading System (ETS), convergence with EU regulations on product footprinting, and participation in initiatives such as PEF pilots and EPDs are moving Ukraine toward EU standards. These changes require robust LCA capacity, standardized methodologies, and the establishment of verification bodies for LCA-based declarations.

Reconstruction efforts are guided by the principle of "green recovery," emphasizing modern, efficient, and low-carbon solutions. LCA serves as the analytical tool for optimizing design choices—comparing materials, energy options, and waste strategies to avoid locking in unsustainable practices. Reconstruction funding by international partners increasingly requires demonstration of sustainability, including LCA-based criteria for infrastructure and building projects.

Life-cycle thinking supports Ukraine's commitments under the Paris Agreement and the UN Sustainable Development Goals, ensuring that progress on reconstruction and EU integration delivers

measurable environmental benefits. LCA guides circular economy strategies and identifies priority investments in cleaner technologies and materials.

Challenges and Future Directions

Despite rapid progress, challenges remain. Data quality and availability continue to limit comprehensive LCA, especially in sectors without prior experience. Capacity is concentrated among a small group of experts. The following steps are proposed:

- Enhancing knowledge exchange through networks and annual conferences for LCA practitioners.
- Developing specialized platforms and guidance for businesses and policymakers, including repositories of emission factors and case studies.
- Integrating LCA into business and government decision-making via pilot projects and outreach.
- Strengthening the academic-policy interface by involving researchers in drafting sectoral methodologies and standards.
- Securing funding and international support for LCA capacity building in reconstruction and EU alignment programs.

The continuation and expansion of these efforts will determine the pace at which LCA becomes a standard component of policy and industry in Ukraine.

Conclusion

The development of LCA in Ukraine has reached a critical juncture, catalysed by the combined needs of post-war reconstruction and EU integration. Policy frameworks, technological capacity, and academic expertise have advanced rapidly, compressing a developmental trajectory that elsewhere unfolded over decades. LCA now supports procurement, construction, waste management, and export policy, and is being integrated into educational and research programs. The coming years will require continued capacity building, collaboration, and political support to fully institutionalize LCA in decision-making. With sustained effort, Ukraine is poised to become a regional leader in life-cycle thinking and a model for sustainable reconstruction and green growth.

References

1. European Union. (2014). *Association Agreement between the European Union and Ukraine* (CELEX: 22014A0529(01)). Retrieved October 26, 2025, from https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A22014A0529%2801%29
2. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). *Law of Ukraine "On Public Procurement" (No. 922-VIII).* Retrieved October 26, 2025, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19#Text
3. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (n.d.). *Eco-labelling and public procurement.* Retrieved October 26, 2025, from https://mepr.gov.ua/en/biznesu/ekologichne-markuvannya/ekologichne-markuvannya-ta-publichni-zakupivli/
4. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). *Law of Ukraine "On Information for Consumers on Food Products" (No. 2639-VIII).* Retrieved October 26, 2025, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text
5. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). *Law of Ukraine "On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine on Improving Waste Management" (No. 2320-IX).* Retrieved October 26, 2025, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text

6. European Parliament and Council. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)* (CELEX: 32008L0098). Retrieved October 26, 2025, from https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098

7. EU4Environment. (2024). *Product Environmental Footprint (PEF) Executive Report – Ukraine.* Retrieved October 26, 2025, from https://www.eu4environment.org/app/uploads/2024/09/PEF-Executive-Report-Ukraine.pdf

8. Green Deal Ukraine. (n.d.). *CBAM report.* Retrieved October 26, 2025, from https://greendealukraina.org/assets/images/reports/cbam.pdf

9. One Click LCA. (n.d.). *Stand with Ukraine: Ukrainian Reconstruction Projects.* Retrieved October 26, 2025, from https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/11510273345180-Stand-with-Ukraine-Ukrainian-Reconstruction-Projects

10. Afifi, A. S., & Kim, A. S. (2025). A 21-Year study of virtual water trade in Ukraine's agricultural sector: Crop production and water use. *Water, 17*(8), 1231.

11. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (n.d.). *Second training workshop on current issues in the SEA procedure in Ukraine: Practical aspects.* Retrieved October 26, 2025, from https://unece.org/environmental-policy/events/second-training-workshop-current-issues-sea-procedure-ukraine-practical

12. Sumy State University, BIEM Institute. (n.d.). *SumDU and RTU collaborate on virtual academic mobility program.* Retrieved October 26, 2025, from https://econ.biem.sumdu.edu.ua/en/sumdu-and-rtu-collaborate-on-virtual-academic-mobility-program

13. Sumy State University, BIEM Institute. (n.d.). *LCA Hub – Laboratory of Socio-Economic Systems Life-Cycle Assessment.* Retrieved October 26, 2025, from https://econ.biem.sumdu.edu.ua/en/lca-hub-laboratory-of-socio-economic-systems-life-cycle-assessment

14. Global Ecolabelling Network. (n.d.). *Green Crane (Ukraine).* Retrieved October 26, 2025, from https://globalecolabelling.net/organisation/green-crane/

НА ШЛЯХУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ТА СТАЛОЇ УКРАЇНИ: ПРОГРЕС В ОЦІНЦІ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ В ПОЛІТИЦІ, ТЕХНОЛОГІЯХ ТА НАУЦІ

Іван ГЕТЬМАН
Лінчепінзький університет
Norrköping, SE-601 74, Швеція
Клінічне відділення медицини праці та довкілля
Region Östergötland, SE-581 85 Linköping, Швеція
https://orcid.org/0000-0002-2185-7885

Анотація

У статті подано огляд динамічного розвитку оцінювання життєвого циклу (ОЖЦ, LCA) в Україні станом на 2025 рік. Показано, як регуляторні реформи, інтеграція з ЄС, післявоєнна відбудова та зусилля академічної спільноти прискорили запровадження ОЖЦ у національну політику, технології та практику. До ключових віх віднесено прийняття стандартів ISO, інтеграцію ОЖЦ у систему публічних закупівель і будівельні норми, а також формування інфраструктури даних і експертного потенціалу. Рух України до сталого розвитку підтримується ОЖЦ як провідною методологією для забезпечення «зеленого» зростання, скорочення викидів і розвитку циркулярної економіки.

Ключові слова: оцінка життєвого циклу (LCA), політика сталого розвитку, повоєнне відновлення, Україна, екологічне регулювання.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.332068

THE ECOLOGISATION (GREENING) OF HIGHER EDUCATION AND THE ROLE OF TEACHING ENVIRONMENTAL AND LEGAL COURSES IN THE TRAINING OF HIGHER EDUCATION STUDENTS

Yevheniia LYPNYTSKA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteiskyi prospekt, 37, m. Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: lip.evgeniya2022@gmail.com

Abstract

The paper studies the concept of greening higher education and its critical importance in the current context of increasing global environmental challenges. The author substantiates that the integration of environmental knowledge and principles into the curricula of all specialties is an urgent need for the formation of an environmentally conscious society, the achievement of the Sustainable Development Goals, and Ukraine's European integration process.

Particular attention is paid to the role of environmental law disciplines, such as «Environmental Law», «Environmental Safety Law» etc. It is shown that the study of these disciplines is important and expedient not only for students of higher education in legal specialties, to whom it provides fundamental knowledge for law enforcement activities, but also for students of higher education in other, in particular technical and natural sciences specialties.

Scientific approaches to defining the concept of greening higher education and its relevance and expediency in the context of European integration are explored. It is emphasised that knowledge of the legal basis for regulating environmental relations allows future specialists in various fields to: make environmentally sound decisions in their professional activities; comply with national legislation and European environmental requirements, which are being actively implemented in national legislation; prevent environmental offences and understand the legal consequences of committing them; effectively promote sustainable development and the implementation of green technologies and practices.

The role of higher education institutions in training a new generation of specialists who combine in-depth professional knowledge with a strong environmental and legal awareness, which is a guarantee of environmental safety and sustainable development, is emphasised.

Keywords: *greening (ecologisation) of higher education, environmental law disciplines, environmental law, sustainable development, European integration.*

The greening of higher education is a multifaceted and strategically important process in today's world. This concept goes beyond simply 'greening campuses' and involves the deep integration of sustainable development and environmental responsibility principles into all aspects of university

activities. It aims to educate environmentally responsible individuals who are capable of addressing complex environmental, social and economic challenges [1].

Universities are recognised as key agents of transformation and drivers of sustainable development, playing a crucial role in training professionals who are aware of and capable of implementing environmentally conscious nature management, thereby contributing to the achievement of the Sustainable Development Goals proclaimed at the UN General Assembly. They contribute to this through their core functions: scientific research, educational activities and leadership in society.

The issue of greening education, including higher education, is quite relevant in the scientific community both nationally and internationally. Among domestic scientists, we can highlight T.A. Safranova, A.V. Chugai, Yu.Yu. Tunitsa, M.G. Adamovskyi, M.M. Boris, S.N. Kraevsky, I.P. Magazynshchikov and others. The problems of teaching environmental law disciplines in Ukraine have been addressed by such leading scientists in the field of environmental law as N.R. Kobetska, A.P. Getman, V.L. Bredikhina. The issues of greening higher technical education were studied in the works of O.O. Troitskaya, K.V. Belokon, E.A. Manidina, and others.

The purpose of the study is to substantiate the role and significance of studying environmental law disciplines in the process of greening higher education for the training of higher education seekers in various specialities.

There are many approaches to understanding the concept of 'greening education', including higher education, in scientific literature. Safranov T.A. defines the greening of higher education for 'non-ecological' higher education institutions as the formation of a system of knowledge and practical skills in future specialists in a wide range of specialities, which will allow them to navigate various environmental problems and ensure environmental safety. At the same time, he points out that greening education is one of the prerequisites for implementing the principles of sustainable development [2].

A broader approach interprets the concept of greening the education system as a process of forming ecological worldviews, a new philosophy of life, a type of thinking and relationships in the human-technosphere-biosphere system by introducing special environmental disciplines into the curricula of all educational institutions in Ukraine, as well as filling other disciplines with environmental content. At the same time, scientists agree that greening education is necessary and will ensure the greening of the traditional economy, bringing it into line with the laws of nature, and the preparation and education of a new person with a fundamentally new way of economic thinking [3].

Foreign scientific literature applies an even broader approach to understanding this concept (using terms such as greening higher education, sustainable higher education, and education for sustainable development), namely, as a comprehensive process of integrating environmental principles and practices into all aspects of university activities, including not only educational programmes and research, but also campus management, infrastructure, and community engagement [4].

The central goal of greening higher education is to foster an ecological culture and ecological competencies among higher education students. This involves developing ecological thinking, a responsible attitude towards the environment, and practical skills for identifying and solving environmental problems [5].

This paper will examine one of the elements of greening higher education, which consists in integrating environmental knowledge and principles into the curricula of various specialties. In this regard, the study will focus on the role of studying environmental law disciplines, since law is one of the main tools for regulating relations in the field of environmental protection and ensuring environmental safety.

We should support V.L. Bredikhina, who, in her publication on the methodology of teaching environmental law disciplines, defines the greening of education as filling the curricula for training higher education students in all fields of knowledge and specialities with environmental requirements. At the same time, the researcher points out the importance of disseminating not only purely environmental knowledge, but also providing students of various educational institutions with environmental and legal information related to the study of environmental legislation, the basic principles of legal regulation of rational nature use and environmental protection [6].

Indeed, in the context of growing environmental problems, it is extremely important to shape the ecological worldview and understanding of legal mechanisms for environmental protection in future specialists, regardless of their specialisation. This is in line with the provisions of the Law of Ukraine 'On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period until 2030,' according to which one of the tasks of state environmental policy is the implementation of education in the interests of balanced (sustainable) development, environmental education and upbringing, and educational activities [7]. One can support the position of scientists that environmental knowledge and knowledge of environmental and legal norms are elements of environmental culture as a set of various approaches to the development of nature from the point of view of its value at the spiritual (intellectual) and material (practical) levels, as well as elements of an environmental worldview [8].

The issue of teaching environmental law subjects includes two aspects: 1) teaching for law students; 2) teaching for students of other specialities.

For law students, studying environmental law is fundamental. It shapes their understanding of the legal foundations of environmental policy, the mechanisms of legal regulation of nature use and environmental protection, and liability for environmental offences. This allows for the training of qualified lawyers who are able to effectively apply environmental legal norms in their professional activities, promote compliance with environmental legislation, and protect the environmental rights of citizens. However, today, environmental law disciplines, primarily 'Environmental Law,' are included in educational programmes for bachelor's degrees in law on a residual basis. The higher education standard for the speciality 081 'Law' in the field of knowledge 08 "Law" for the first (bachelor's) level of higher education includes only the general competence of applicants, namely, 'the desire to preserve the environment.' Thus, the obligation to acquire competencies in the field of environmental law is only partially taken into account. This means that the question of whether or not to include the academic discipline 'Environmental Law' in the curriculum, its status, scope, and form of control remain at the discretion of specific universities [8].

For example, at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (hereinafter referred to as KPI), 'Environmental Law' is part of the general education component, for which only 2 credits are allocated. According to the educational programme 'Law' for bachelor's degree higher education in 2024, this educational component has been moved from the second to the first year of training, which violates the logical sequence of acquiring professional knowledge and skills by students (in particular, environmental law is based on knowledge of constitutional, civil, administrative and criminal law, which are mainly taught in the second year of study) [9]. At the same time, it should be understood that the formation of a conscious and humane attitude towards the natural environment and its individual elements in future lawyers will influence the corresponding practice of applying environmental legislation, as well as rule-making in our country.

For students of non-legal specialities, especially technical ones, environmental and legal knowledge is no less important. Engineers, technologists, specialists in the fields of construction, energy, biotechnology and other technical areas will directly encounter issues related to the impact of production processes on the environment in their future professional activities. Understanding

environmental requirements, standards, environmental impact assessment procedures, and the legal consequences of violating environmental legislation will enable them to make environmentally sound technical decisions, minimise negative impacts on the environment, and promote the implementation of environmentally friendly technologies.

Head of the Department of Ecology and Environmental Protection at Odessa State Environmental University T.A. Safranov, notes that in most higher education institutions, the curricula of 'non-ecological' specialties include the discipline "Ecology" or 'Fundamentals of Ecology,' which covers only the basic provisions of classical ecology without taking into account the future activities of the students. Under such conditions, it is only possible to speak indirectly about obtaining the necessary knowledge and practical skills regarding the environmental component of education for sustainable development [2]. In this regard, it should be noted that when training future specialists who will be involved in the production of goods that may have an impact on the environment and human health, both purely ecological disciplines (which will take into account the specifics of the speciality and study the possible negative impact on the natural environment and measures to prevent it) and ecological and legal disciplines aimed at studying the basic principles of legal regulation of rational nature use, environmental protection and ensuring environmental safety.

At the same time, it is important for applicants to understand both the basic legal institutions of environmental law (the right to use natural resources, property rights, liability for environmental offences, general principles of environmental safety, environmental rights and obligations of citizens) and the specifics of legal regulation of individual environmental relations that arise during the production of certain products, construction, reconstruction, development of facilities, etc. The study of the legal foundations of rational nature use and ensuring environmental safety is possible through the introduction of elective courses or separate modules into educational programmes of technical or other (non-legal) specialities, which can be included in normative disciplines.

KPI trains students in various technical, natural science and other specialties. For example, the educational programme 'Biotechnology' in the speciality 162 'Biotechnology and Bioengineering' [10] or the educational programme 'Non-traditional and Renewable Energy Sources' in the speciality 141 'Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics' at the bachelor's level of higher education [11] contain such a normative educational component as 'Industrial Ecology', the purpose of which is to study the impact of industrial emissions on the environment and the possibility of reducing this impact by improving technologies and treatment facilities. The content of this academic discipline may include a module (several topics) devoted to the formation of knowledge about the system of environmental legislation and environmental requirements for a particular type of production, work, etc. It would also be advisable to offer applicants elective disciplines that will contribute to the deepening of knowledge in a particular field (for example, on the legal basis for ensuring chemical safety, waste management, food production safety, etc.).

In addition, the relevance and necessity of introducing environmental law disciplines into educational programmes for higher education students is emphasised by the fact that Ukraine has committed itself to implementing the EU acquis Communautaire, a significant part of which concerns environmental law. This means that every specialist, regardless of their field of activity, must be prepared to work in a legal environment that is constantly adapting to European requirements. Accordingly, the study of environmental law disciplines is becoming not only a matter of national environmental security, but also a strategic necessity for the training of higher education students in various specialities who, in their future professional activities, will be directly involved in the implementation and enforcement of European environmental standards.

Therefore, the greening of higher education is a key factor in ensuring the sustainable development of Ukraine, which aims to guarantee the economic growth necessary to meet the current

needs of society, as well as the needs of future generations, through the rational use of natural resources. The study of environmental and legal disciplines is a necessary element of modern higher education and plays an important role in the training of higher education students of all specialities, shaping their environmental awareness, understanding of legal mechanisms for environmental protection, and ability to make environmentally responsible decisions in their future professional activities. At the same time, higher education institutions have a decisive role to play in achieving the Sustainable Development Goals. This role goes far beyond the traditional provision of knowledge. It consists of a systematic transformation of approaches to training specialists who are not only highly qualified professionals in their field, but also environmentally conscious citizens capable of integrating the principles of sustainable development into their professional and everyday activities.

References

1. Citation: Caird S., Roy R. Sustainable Higher Education Systems. In: Leal Filho W. (eds) Encyclopedia of Sustainability in Higher Education. Springer. 2019. Cham. URL: https://oro.open.ac.uk/55786/8/Sustainable+Higher+Education+System_%20Final%20_Nov2018.pdf
2. Safranov T.A. Ecologization of higher education as an important component of education for sustainable development. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/11.pdf
3. Safranov T.A., Chugai A.V. Features of ecologization of the Ukrainian system of higher education. URL:http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10030/1/Ecol-OrientVishOsvita_Harkiv_28-29okt_2021_61-64.pdf
4. INTEGRATING GREEN SKILLS INTO EDUCATION AND RESEARCH. URL: https://ufmsecretariat.org/wp-content/uploads/2024/11/UfM_Paeradigms_Integrating_green_skills_into_education_and_research.pdf
5. Barbara Lobo. Environmental Education: A Sustainability Pathway. The Text, Vol.5, No.2. (July 2023). URL: http://thetextjournal.com/text_admin/issue/7083-5-barbara-july-2023-pdf.pdf
6. Bredikhina V.L. Some issues of teaching methods of environmental and legal disciplines in the context of sustainable development. URL: https://dspace.nlu.edu.ua/bitstream/123456789/11840/1/Bredihina_17-19.pdf
7. On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the period up to 2030: Law of Ukraine of February 28, 2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text
8. Kobetska N.R. Peculiarities of teaching environmental law in Ukraine: theoretical and applied aspects. Scientific and practical journal «Environmental Law». Issue 4, 2020. P. 20-25. DOI https://doi.org/10.37687/2413-7189.2020.4.4
9. Educational and professional program of the first (bachelor's) level of higher education «Law». Educational process of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. URL: https://osvita.kpi.ua/081-p
10. Educational and professional program of the first (bachelor's) level of higher education «Biotechnology», specialty 162 «Biotechnology and bioengineering». Educational process of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. URL: https://osvita.kpi.ua/sites/default/files/opfiles/162_oppb_bt_2024.pdf
11. The educational program of the first (bachelor's) level of higher education "Non-traditional and renewable energy sources" in the specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". Educational process of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. URL: https://osvita.kpi.ua/sites/default/files/opfiles/141_oppb_nvde_2024.pdf

ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА РОЛЬ ВИКЛАДАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН ЕКОЛОГО-ПРАВОВОГО СПРЯМУВАННЯ У ПІДГОТОВЦІ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Євгенія ЛИПНИЦЬКА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський п-т, 37, м. Київ, 03056
https://orcid.org/0000-0003-4608-1734

Анотація

В роботі досліджується поняття екологізації вищої освіти та її критичне значення в сучасних умовах посилення глобальних екологічних викликів. Обґрунтовується, що інтеграція екологічних знань та принципів у навчальні програми всіх спеціальностей є нагальною потребою для формування екологічно свідомого суспільства, досягнення Цілей сталого розвитку, а також євроінтеграційного процесу України.

Особлива увага приділяється ролі дисциплін еколого-правового спрямування, таких як «Екологічне право», «Право екологічної безпеки» та ін. Показано, що вивчення цих дисциплін є важливим і доцільним не лише для здобувачів вищої освіти юридичних спеціальностей, яким це дає фундаментальні знання для правозастосовчої діяльності, а й для здобувачів вищої освіти інших, зокрема технічних, природничих спеціальностей.

Досліджуються наукові підходи до визначення поняття екологізації вищої освіти та обгрунтовується її актуальність і доцільність в умовах євроінтеграції України. Наголошується, що знання правових основ регулювання екологічних відносин дозволяє майбутнім фахівцям різних галузей: приймати екологічно обґрунтовані рішення у своїй професійній діяльності; дотримуватися національного законодавства та європейських екологічних вимог; запобігати екологічним правопорушенням, розуміти юридичні наслідки їх вчинення; ефективно сприяти сталому розвитку та впровадженню «зелених» технологій та практик.

Підкреслюється роль закладів вищої освіти у підготовці фахівців нового покоління, які поєднують глибокі професійні знання зі стійкою еколого-правовою свідомістю, що є запорукою екологічної безпеки та сталого розвитку.

Ключові слова: екологізація вищої освіти, навчальні дисципліни еколого-правового спрямування, екологічне право, сталий розвиток, євроінтеграція.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331067

THE INTRODUCTION OF HALOPHYTES AS NATURE-BASED SOLUTIONS IN WASTEWATER TREATMENT FOR THE MALAYSIAN AQUACULTURE INDUSTRY

Mariam MARIP[1,2], Juris BURLAKOVS[3], Mohamad Nor AZRA[2,4,5]
[1] *Institute of Climate Adaptation and Marine Biotechnology (ICAMB), Universiti Malaysia Terengganu (UMT)*
Kuala Nerus 21030, Terengganu, Malaysia
[2] *Department of Fisheries (Terengganu)*
Taman Perikanan Chendering, 21080 Kuala Terengganu, Terengganu, Malaysia
[3] *Riga Technical University*
Kipsalas 6A, LV-1048, Riga, Latvia
[4] *Research Center for Marine and Land Bioindustry, Earth Sciences and Maritime Organization, National Research and Innovation Agency (BRIN)*
Lombok 83352, Indonesia
[5] *Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Jiangsu Ocean University*
No. 59 Cangwu Road, Haizhou District, Lianyungang City, Jiangsu, 222005, China
e-mail: mariam_marip@dof.gov.my

Abstract

Aquaculture became very important in the seafood sector in recent times owing to the depletion of the wild stock, and it is recognized as a major contributor to seafood for human consumption. Meanwhile, halophytes, recognized for their extreme resilience to saline environments, have gained prominence as pivotal components in climate adaptation strategies, phytoremediation, and sustainable agriculture. However, the main sustainability issues associated with intense aquaculture, as exemplified by seafood products, are the large amounts of wastewater generated that are discharged with minimal treatment. The aim of the proposed presentation is to establish new innovation to address the above problems, using halophytes within a bespoke production system, the first of its kind in the Malaysian aquaculture industry. The findings from the proposed work will be timely given the increasing consequences of climate change and the drive towards sustainable solutions. It will enable the direct beneficiaries, such as Malaysia to accelerate sustainable aquaculture development and take a leading role in the wider SEA region in developing sustainable solutions for producing an important source of global food security. This will be an exemplary case to be followed elsewhere, globally.

Keywords: *Climate adaptation; Ecophysiology; Food security; Sustainability; SDG-Life below water.*

Introduction

Halophytes, as highly salt-tolerant plants, offer a strong potential for tackling soil salinisation and climate adaptation challenges, particularly in salinity-vulnerable areas for agriculture. Halophytes, recognized for their extreme resilience to saline environments, have gained prominence as pivotal components in climate adaptation strategies, phytoremediation, and sustainable agriculture. Emerging applications in sustainable agriculture highlight their potential; *Salicornia europaea*, for example, improves soil nutrients and exhibits antimicrobial and anti-inflammatory properties, making it ideal for saline farming. Halophytes have also demonstrated significant potential in the phytoremediation of saline and contaminated soils, particularly in regions affected by anthropogenic activities that result in heavy metal contamination **[1]**. The introgression of salt tolerance genes from halophytes into glycophytes through breeding or genetic engineering has been proposed as a strategy to develop salt-tolerant crop varieties. The unique adaptations of halophytes to saline conditions make them ideal candidates for use in saline agriculture, particularly in regions where soil salinisation renders conventional crops unviable, and to produce better water quality management in shrimp aquaculture in the future.

Nowadays, numerous technologies available, from simple methods to complicated mechanical system that could be used for aquaculture wastewater treatment from conventional method such as physical, chemical and biological **[2]** to mechanical system such as activated sludge systems, biofiltration systems, oxidation ditches, rotating biodisc systems, and membrane **[3]**. Although, the basis of the consideration is aquaculture wastewater treatment that meets the recommended microbiological and chemical quality guidelines at low cost and minimal maintenance requirements. Specifically, certain halophytes possess antimicrobial properties and can influence rhizosphere microbial communities, thereby reducing the presence of pathogenic microorganisms. Thus, uncertainty the extent of its effectiveness in aquaculture wastewater treatment and retention times adequate to eliminate or reduce the huge amount of effluent and organic load before release to water bodies needs to be evaluated. Other than that, global not only faces the enormous challenge of providing food for a continuously growing population as mention in Blue Revolution, but withstanding the effects of climate change and widespread degradation of natural resources as a main agenda and defined in SDG 14 "Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development" [**4**] as discussed above. On the basis of these considerations, this study extends the reflection to the aquaculture sector as a whole and argues that policy coherence and benefit sharing should become key considerations in the planning and future development of sustainable and equitable aquaculture. To date, there are scarce data from journal publications on the aquaculture industry, especially regarding environmental impacts due to effluent from aquaculture farms; the regulated environmental acts governing the effluent; best practices adopted in the aquaculture industry; and the currently available treatment technologies for aquaculture effluent **[5]**.

Objectives

Addressing these issues is critical through the utilization of halophytes for sustainable food systems, improved aquaculture wastewater treatment, and soil reclamation which directly contribute to global efforts in combating food insecurity, restoring degraded ecosystems, and achieving climate resilience. Figure 1 shows the ability of certain halophytes to hyperaccumulate heavy metals (such as from agricultural activities such as aquaculture and coupled with their inherent salt tolerance, making them ideal candidates for the remediation of polluted soils as well as potential future application.

Potential impacts of halophytes

Maximizing Positive Impact: To ensure a lasting positive impact, our engagement plan is tailored to each stakeholder group. Measuring impact will combine quantitative and qualitative methods, including economic assessment, environmental monitoring, policy analysis, and stakeholder feedback. Online platforms, including the project website, will reach a broader audience, ensuring accessibility. Feedback loops will ensure alignment with stakeholder needs, enhancing our positive impact during and beyond the grant's lifetime. Aquaculture industry practitioners: Workshops, field demonstrations, and participatory research activities to showcase sustainable practices and technologies, disseminate research findings, and gather stakeholder feedback. Pre- and post-engagement surveys will assess changes in knowledge, attitudes, and practices among shrimp farmers and related stakeholders. Impact measures: Surveys to assess changes in practices, productivity, and environmental impact. Local communities and the aquaculture value chain: Engagement: Community meetings, educational programs, and involvement in research activities to ensure inclusive benefits and knowledge sharing. Impact measures: Livelihood assessments to gauge economic and social impacts, with a focus on improved living conditions and adaptation to climate change. Policymakers and regulatory bodies: Engagement: Policy briefs, roundtable discussions, and collaborative forums to share research findings and recommendations for sustainable aquaculture policies. Impact measures: Policy adoption rates and changes in regulatory frameworks as indicators of engagement effectiveness. Research communities: Engagement: Academic publications, conferences, and joint research initiatives to disseminate findings and foster collaborative research. Impact measures: Citation analysis and collaborative project counts to measure research influence and partnerships. Environmental impacts statement: Expected positive impacts: Reduced nutrient runoff: By absorbing excess nutrients, halophytes decrease risk of eutrophication or algal blooms in nearby water, promoting healthier aquatic ecosystems.

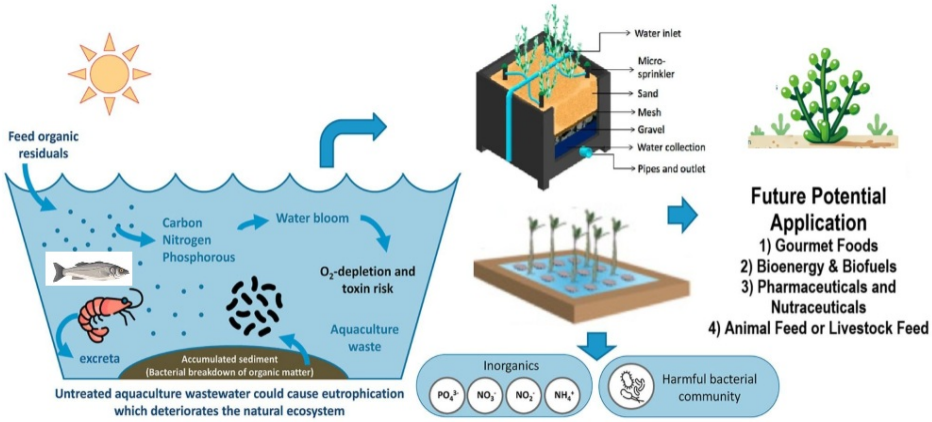


Fig. 1. *Example of hyperaccumulation capacity of halophytes for heavy metals in fish or shellfish's aquaculture ponds and the future potential and application of halophytes Modification from Castagna et al. [6]*

Enhanced carbon sequestration: Halophytes can contribute to carbon sequestration, aiding climate change mitigation. Biodiversity enhancement: Halophytes can contribute to biodiversity conservation within aquaculture systems, offering habitats and resources for other potential aquatic species. Resource use: The project will ensure efficient use of water and land resources to prevent overexploitation, employing sustainable aquaculture practices in harmony with local environmental capacities. Mitigation of potential negative impacts: Habitat disturbance: Halophyte introduction

could potentially disturb local flora and fauna. Native species will be selected (such as sea purslane and moras-bhaji) or those shown to integrate well with local ecosystems, minimizing ecological disruption. Expected societal benefits. Local communities in Malaysia & Indonesia: These are dependent on aquaculture for livelihoods, particularly in regions susceptible to disruption due to global change. They may additionally benefit from added-value products emerging from our project as well as environmental improvements brought by halophytes on water quality. Economic benefits. The proposed project targets the integration of halophytes with aquaculture to harness their synergistic potential to improve water quality and benefit farmers economically. Scientific benefits: Environmental and climate change research communities: Academics and researchers focusing on environmental sustainability and climate resilience in aquaculture. Policymakers and regulatory bodies: These key decision-makers influence aquaculture policies, regulations, and support mechanisms and will be an important part of encouraging technology uptake.

This study also supported the National Policy on Climate Change 2.0 (ST3S4KA2: Promote agricultural research and innovations to increase varieties of climate-resilient and disease-resistant food crops, commercial crops, livestock breeds, fish as well as technologies and practices for sustainable farming systems). The study will also collect some water quality data related parameters as in Table 1.

Table 1. Methods used for each parameter

Aquaculture Wastewater and Water Culture		
Categories	**Parameter**	**Methods / Instrument**
Physical	pH Dissolved Oxygen Salinity Temperature Total Dissolved Solids (TDS) Conductivity	YSI Pro
Chemical	Biochemical Oxygen Demand	BOD5 (APHA, 1999)
	Chemical Oxygen Demand (COD)	Method 5220D Closed Reflux Method Colorimetric Method (APHA, 1992)
	Nitrogen (Ammonia – NH3)	Direct Nesslerization (ASTM, 2008)
	Total Suspended Solids	Photometric method (Krawczyk & Gonglewski, 1959)
	Nitrite	Diazotization Method (Federal Register, 1979)
	Nitrate	Method 4500-NO3 Cadmium Reduction Method (APHA, 1992)
	Total Nitrogen	Method 4500-N Persulfate Method (APHA, 2005)
	PO4 (Phosphate)	Method 4500-P Ascorbic Acid Method (APHA, 2005)
	Chlorine residue	APHA (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed.)
	Oil & Grease	APHA (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed.)
Bacteriology parameter	*Vibrio alginolyticus* *Vibrio vulnificus* *Vibrio parahaemolyticus*	

Acknowledgements

Mohamad Nor Azra thanked the National Research and Innovation Agency (In Indonesia: Badan Riset dan Inovasi Nasional, BRIN) Indonesia for his "Visiting Researcher" in 2025. Authors also thanks International Development Research Centre (IDRC) and the Government of Canada under the innovative research project entitled "Climate-Adaptive, Inclusive, Nature-Based Aquaculture (CAINA) in Malaysia and Solomon Islands" to ICAMB researchers with Vot. Number 51013 and Project ID: 110226, from 2024 to 2027. This work was also supported by the UK Department for Science, Innovation and Technology's International Science Partnership Fund (ISPF) with strategic partnership of the Academy of Sciences Malaysia (ASM) entitled "Community-Driven Nature-Based Solutions for Environmental Sustainability in Malaysian Aquaculture" under the ISPF, International Research Empowerment Programme (IREP), Grant/Award Numbers: Lead Collaborator Ref: WT 2045217 / ST 2122350 from 2025 to 2026.

References

1. Gupta, S. R., Dagar, J. C., Singh, R., & Sharma, H. R. (2024). Exploring the potential of halophytes for bioremediation of salt-affected soils: A review. Halophytes vis-à-vis Saline Agriculture: Perspectives and Opportunities for Food Security, 409-440.
2. Ying-Feng Lin; Shuh-Ren Jing; Der-Yuan Lee; Tze-Wen Wang (2002). Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system, 209(1-4), 0–184. doi:10.1016/s0044-8486(01)00801-8.
3. Adhikari, Kushal; Fedler, Clifford B. (2020). Water sustainability using pond-in-pond wastewater treatment system: Case studies. Journal of Water Process Engineering, 36(), 101281–. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101281.
4. Cortés, A., Ramón Casillas-Hernández;Cristina Cambeses-Franco;Rafael Bórquez-López;Francisco Magallón-Barajas;Walter Quadros-Seiffert;Gumersindo Feijoo;Maria Teresa Moreira; (2021). Eco-efficiency assessment of shrimp aquaculture production in Mexico. Aquaculture, doi:10.1016/j.aquaculture.2021.737145.
5. Ahmad, A.; Siti Rozaimah Sheikh Abdullah;Hassimi Abu Hasan;Ahmad Razi Othman;Nur 'Izzati Ismail; (2021). Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. Journal of Environmental Management, (). doi:10.1016/j.jenvman.2021.112271.
6. Castagna, A., Mariottini, G., Gabriele, M., Longo, V., Souid, A., Dauvergne, X., ... & Ranieri, A. (2022). Nutritional composition and bioactivity of Salicornia europaea L. plants grown in monoculture or intercropped with tomato plants in salt-affected soils. Horticulturae, 8(9), 828. https://doi.org/10.3390/horticulturae8090828.

ГАЛОФІТИ В ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД У АКВАКУЛЬТУРНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ: МАЛАЙЗІЙСЬКИЙ ПРИКЛАД ПРИРОДООРІЄНТОВАНИХ РІШЕНЬ

Маріам МАРІП
Інститут адаптації до клімату та морської біотехнології (ICAMB), Університет Малайзії
Kuala Nerus 21030, Terengganu, Малайзія
https://orcid.org/0009-0000-3662-0285

Юріс БУРЛАКОВС
Ризький технічний університет
Kipsalas 6A, LV-1048, Riga, Латвія
https://orcid.org/0000-0003-2607-6997

Мохамад Нор АЗРА
Університет Малайзії Теренгану
Taman Perikanan Chendering,
21080 Kuala Terengganu, Terengganu, Malaysia
National Research and Innovation Agency
Lombok 83352, Indonesia
Jiangsu Ocean University
No. 59 Cangwu Road, Haizhou District,
Lianyungang City, Jiangsu, 222005, China
https://orcid.org/0000-0001-9333-9270

Анотація

Аквакультура останнім часом набула великого значення в секторі морепродуктів через виснаження природних запасів і визнана основним джерелом морської їжі для споживання людиною. У той же час галофіти, відомі своєю надзвичайною стійкістю до солоних середовищ, набули важливого значення як ключові елементи у стратегіях адаптації до кліматичних змін, фіторемедіації та сталого сільського господарства. Водночас основною проблемою сталості, пов'язаною з інтенсивною аквакультурою (зокрема при виробництві морепродуктів), залишається велика кількість стічних вод, що скидаються з мінімальним очищенням. Мета запропонованої презентації — представити новаторське рішення для подолання цих проблем шляхом використання галофітів у спеціально розробленій виробничій системі, яка є першою у своєму роді в аквакультурній промисловості Малайзії. Результати цієї роботи будуть своєчасними з огляду на посилення наслідків змін клімату та зростаючий попит на сталі рішення. Це дозволить безпосереднім бенефіціарам, зокрема Малайзії, пришвидшити сталий розвиток аквакультури та відігравати провідну роль у регіоні Південно-Східної Азії у впровадженні стійких рішень для виробництва важливого джерела глобальної продовольчої безпеки. Це стане зразковим прикладом для наслідування в інших частинах світу.

Ключові слова: адаптація до клімату, екофізіологія, продовольча безпека, сталий розвиток міста, життя під водою.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331150

DEVELOPMENT OF A DATABASE FOR THE PURPOSES OF GEOSPATIAL MODELING OF REGIONAL CLIMATE CHANGE

Viktor PUTRENKO [1], Nataliia PASHYNSKA [2]
[1] *American University Kyiv, EPAM School of Digital Technology*
Poshtova Square, 3, Kyiv, 04070, Ukraine
e-mail: viktor.putrenko@auk.edu.ua
[2] *Taras Shevchenko National University of Kyiv*
Bohdana Hawrylyshyna, 24, St. Kyiv, Ukraine
e-mail: nat.pashynska@gmail.com

Abstract

The study used data from global and regional climate change modelling in the Zakarpattia region for the period up to 2050 using various climate models and scenarios. The study also used data on the administrative-territorial division of the territory, land cover monitoring, analysis of the territory's relief, statistics on natural hazards and socio-economic monitoring of the region's development. All data were structured on the basis of a number of geospatial databases.

The result of the use of GIS is the development of mathematically sound proposals for the formation of a climate change adaptation strategy in the Zakarpattia region of Ukraine for the time horizon up to 2050, based on the use of a set of analytical tools and geospatial databases.

Keywords: Climate Change, Zakarpattia Region, Geoinformation Modelling, Strategy.

Introduction

One of the biggest challenges of our time is the process of global climate change, which directly affects all spheres of life. However, the effects of climate change have very different outcomes depending on the spatial and temporal scale. Therefore, to meet the adaptation needs of individual communities, it is necessary to develop information systems that can cover large, diverse data sets not only in the field of climatology, but also in the social, economic, environmental, governance and security domains. These tasks are solved through the creation of geographic information systems (GIS) with distributed databases, applied modelling algorithms and decision support modules.

The purpose of this study is to develop an integrated approach to building a GIS for generating recommendations and monitoring the process of community adaptation to climate change and global warming. The study formulated requirements for the formation of a geodatabase, modelling of the main components of the natural environment and its response to climate change, vulnerability assessment for the economy, population and ecosystems. The study was carried out for the Zakarpattia region of Ukraine, which is characterized by a variety of natural conditions and significant risks of natural disasters.

Materials and Methods

Methodology is based on methodology created by ESPON CLIMATE project. In the frame of CLIMADAM project, methodology will be adjusted according to conditions in Zakarpattya oblast in Ukraine and respecting expert opinions of project team members or subcontractors. Analysis of exposure, sensitivity, impact, adaptive capacity, and vulnerability is relevant for the preparation process of adaptation strategy. We are not solving problems of emissions, mitigation, climate variability etc., which are subjects of IPPC, energy efficiency strategies, sustainable transport plans or reduction of carbon emissions strategies (Fig. 1).

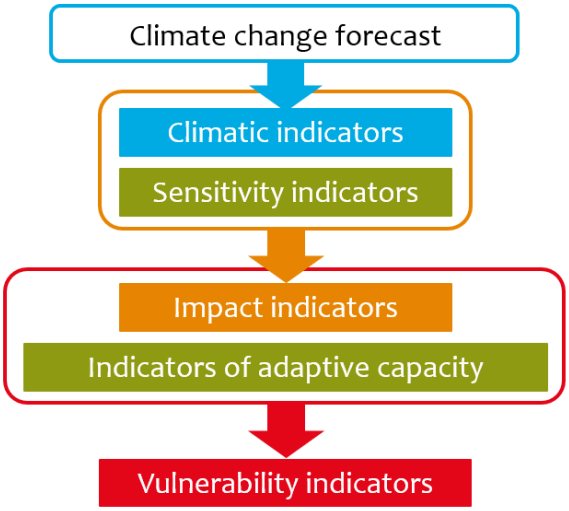


Figure 1. *A general model for assessing the impact of climate change*

At the first stage, the basic administrative units of data collection and unification were determined. Such units are the territorial communities that were formed in the Zakarpattya region in 2019 in the course of the decentralization reform.

Individual indicators are expressed in numerical value for each territory. One numerical value is assigned for each indicator to each territory (municipality). For better clarity, indicators are usually expressed in the form of a map (scheme) where each area of the municipality is assigned to one color depending on the value of the indicator [1].

The calculation of indicator scenarios was undertaken for both regional climate models (models of general atmospheric circulation KMNI and MPI) with a spatial resolution of 25x25 km and a medium emission scenario RPC4.5 [2]. Regional scenarios modification to geographical positions of selected meteorological stations was performed by statistical downscaling, based on comparison of model outputs with measured data in the reference period 1961-1990 (in order to maintain averages and data variability in model outputs). The time horizon scenarios were calculated as the change in the 30-year averages in periods with the midpoint in the years 2005, 2030 and 2050. Scenarios for time horizons are processed for selected meteo stations in the studied region and the surrounding area [3]. Due to the fact that the scenarios differ only slightly between individual stations, such scenarios can be calculated for all stations where the 1961-1990 normals are available. From these scenarios, it is then possible to process temperature maps in future time horizons. Precipitation indicators: In the next procedure, the vertical gradient was calculated, then the meridional and zonal trends were determined. Subsequently, based on the calculated spatial dependencies, scenarios were calculated for all stations where the 1961-1990 normals are available [4].

Based on scenario calculations and statistical downscaling, the projected values of indicators were

accessible in the positions of selected meteorological stations. Raster maps of the indicators were developed where selected interpolation methods were used [5].

Several types of interpolation algorithms were tested, and finally values from individual point data were assigned (interpolated) to individual raster cells. Three-dimensional deterministic interpolation methods were used, which work with information about the latitude, longitude and value of the investigated variable, while another additional variable is the altitude that entered the interpolation in the form of a digital relief model (DEM50). The output was a raster map of the indicator.

Next step:

- convert the raster map to a cadastral ma;
- find a suitable way of data representation (center of cadastre, center of municipality, etc.);
- find suitable weights for indicators when compiling vulnerability maps.

There is also a possibility to consider calculating the aggregate exposure that would result from overlaps (combinations) of multiple exposure indicators. This way, a map of the aggregated exposure (or several thematic aggregated exposures, exposure to extreme phenomena related to drought and high temperature, exposure to extreme water-related phenomena, etc.) will be created, which will generally reflect the extent to which individual parts of the region will be exposed to climate change [6].

In turn, the impact of climate change is determined on the basis of indicators of the territory's sensitivity to climate change correlated with climate indicators, namely:

- change in the average annual air temperature;
- change in the average annual number of frosty days;
- change in the average annual number of summer days (with the maximum daily temperature above 25 degrees Celsius);
- change in the average annual number of tropical days (with a maximum daily temperature above 30 degrees Celsius);
- relative change in the average amount of precipitation in the winter months;
- relative change in the average amount of precipitation in the summer months;
- change in the average number of days with precipitation above 20 mm per day;
- change in the average number of days with snow cover per year;
- relative change in annual potential evaporation;
- change in the arid-climatic moisture indicator.

The cumulative impact of climate change consists of physical, environmental, social, economic, and cultural impacts, which are calculated by comparing the indicators of the territory's sensitivity to climate change with climate indicators.

The physical impact of climate change takes into account the following sensitivity indicators:

- sensitivity of built-up areas to flooding;
- sensitivity of roads and railways to flooding;
- sensitivity of built-up areas to freshets;
- sensitivity of roads and railways to freshets;
- sensitivity of built-up areas to landslides;
- sensitivity of roads and railways to landslides.

The environmental impact of climate change takes into account the following sensitivity indicators:

- sensitivity of forest to fires;
- share of protected areas;
- soil sensitivity to erosion;
- organic carbon content in the soil;

- soil sensitivity to drought;
- share of green areas;
- share of built-up areas.

The social impact of climate change takes into account the following sensitivity indicators:

- a population sensitive to summer heat;
- Flood-sensitive population.

The economic impact of climate change takes into account the following sensitivity indicators:

- sensitivity of forest to drought;
- sensitivity of summer tourism to summer temperatures;
- sensitivity of energy demand to heat;
- sensitivity of energy demand to frost.

The cultural impact of climate change takes into account the sensitivity of immovable cultural heritage sites and museums to flooding.

The combination of the five types of impacts provides an indicator of the cumulative impact of climate change on the territory.

The adaptability of the territory was determined based on the following indicators:

- specific weight of expenditures on development measures in local budgets;
- the percentage of financed expenditures on development measures in local budgets;
- capacity (surplus) of local budgets;
- share of the population with higher education;
- number of places in tourist facilities;
- a population sensitive to summer heat;
- connection to centralized water supply (share of connected households);
- connection to a sewerage network with treatment facilities (share of connected households);
- high-speed Internet access (the share of built-up areas with high-speed Internet connections);
- public participation (voter activity in local government elections);
- provision of services to the population (accessibility of social infrastructure facilities);
- age dependence (the ratio of the elderly population to the working-age population);
- transport accessibility (distance to the regional centre).

The result of comparing the indicators of the cumulative impact of climate change and the adaptive capacity of the territory is the degree of vulnerability of the territory to climate change [7].

Results and Discussion

Based on the collected data, a geospatial data base was formed, which has a rather complex structure. The database includes raster and vector data sets and describes the distribution of the main factors influencing climate change, administrative structure. The sequence of data processing includes primary data from international climate databases, secondary data from input processing, tertiary data that are summarized on the basis of the administrative system, and normalized data that are used in subsequent calculations [8].

Taking into account the expected impacts of climate change and the adaptive capacity of territorial communities, the degree of vulnerability to climate change of the territorial communities of Zakarpattia Oblast was determined. According to the results of the vulnerability calculation, spatial patterns can be noted across the region - the territorial communities of the highlands in the east of the region are characterized by the highest vulnerability, while the western part of the mountainous territorial communities is less vulnerable to climate change, and the territorial communities of the Zakarpattia lowlands are characterized by mostly average vulnerability indicators (Picture 2).

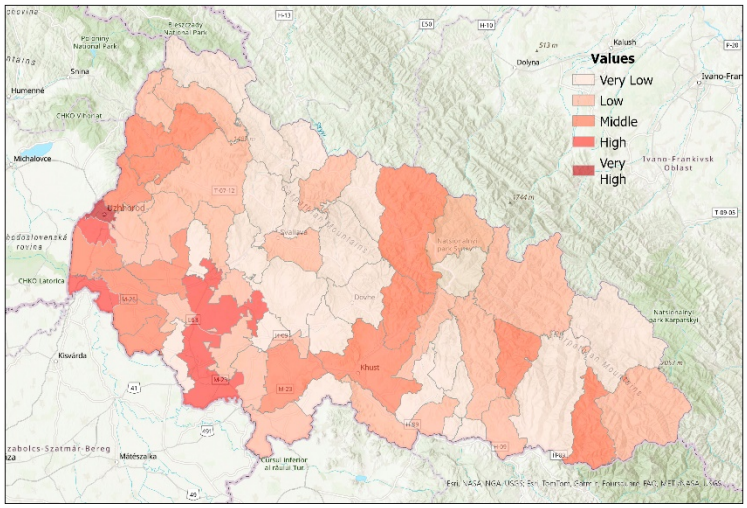


Figure 2. *The degree of vulnerability of communities to climate change*

The territorial communities with the highest level of vulnerability are mountainous, farthest from the regional center with difficult transport accessibility, characterized by higher absolute altitudes than the rest of the region, difficult engineering and geological conditions, the development of hazardous natural processes, and the predominance of forestry and tourism in the economic complex.

Territorial communities with a medium level of vulnerability are mainly concentrated in the Zakarpattia lowlands and are characterized by a high risk of flooding by flood and freshet waters, large areas of agricultural land, higher population density, and most communities have relatively high levels of adaptive capacity [9].

Territorial communities with a low level of vulnerability are located in the western half of the mountainous and foothill territory of Zakarpattia. Most of them are characterized by a low level of cumulative impact and, at the same time, relatively high levels of adaptive capacity.

Conclusion

The result of the study is the formation of an integrated geoinformation system, which, based on a common database and rules for its processing and analysis, provides recommendations on adaptation to climate change at the level of administrative units of Zakarpattia region. Due to the flexibility of the data model, the system periodically updates data analysis and adjusts program measures that are recommended for communities. This will contribute to achieving the goals of sustainable development by the communities of the region.

References

1. Alberton, M.; Andresen, M.; Citadino, F.; Egerer, H.; Fritsch, U.; Götsch, H.; Hoffmann, C.; Klemm, J.; Mitrofanenko, A.; Musco, E.; Noellenburg, N.; Pettita, M.; Renner, K.; Zebisch, M. (2017). Outlook on climate change adaptation in the Carpathian Mountains. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal and Eurac Research, Nairobi, Vienna, Arendal and Bolzano. www.unep.org, www.grida.no, www.eurac.edu

2. Eckstein, D., Hutfils, M. L. and Winges, M., (2020). Global Climate Risk Index 2019, German Watch. https://www.germanwatch.org/ sites/default/files/Global%20Climate%20Risk%20Index%202019_2.pdf

3. Didovets, J., V. Krysanova, G. Bürger, S. Snizhko, V. Balabukh, and A. Bronstert. (2019). Climate change impact on regional floods in the Carpathian region. Journal of Hydrology: Regional Studies 22: 100590

4. Balogun AL, D Marks, R Sharma, H Shekhar, C Balmes, D Maheng, A Arshad, P Salehi (2020) Assessing the potentials of digitalization as a tool for climate change adaptation and sustainable development in urban centres. Sustainable Cities and Society

5. Hawchar Lara, Naughton Owen, Nolan Paul, Mark G. Stewart Mark G., Paraic C. Ryan Paraic C. (2020) A GIS-based framework for high-level climate change risk assessment of critical infrastructure. Climate Risk Management Volume 29, 100235

6. Ferdinando V. and H. McLEOD (2002) Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: Guidelines and applications. Environmental Management 29(3): 335-348

7. Cavan G, Kingston R (2012) Development of a climate change risk and vulnerability assessment tool for urban areas. Int J Disaster Resilience Built Environ 3(3):253–269

8. Kingston, R., Cavan, G., Butlin, T., Gill, S., & Lindley, S. (2014). Web-GIS tools for climate change adaptation planning in cities. In Handbook of Climate Change Adaptation: Climate Change Adaptation Technologies Springer Nature

9. Putrenko, V.V., Pashynska, N.M. (2017). The use of remote sensing data for modeling air quality in the cities. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4(5W1), pp. 57–62

РОЗРОБКА БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ГЕОПРОСТОРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ЗМІН КЛІМАТУ

Віктор ПУТРЕНКО
Американ Юніверсіті Київ
Поштова пл., 3, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-0239-9241

Наталія ПАШИНСЬКА
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Богдана Гаврілішина, 24, Київ, Україна,
https://orcid.org/0000-0002-0133-688X

Анотація

У дослідженні використано дані глобального та регіонального моделювання змін клімату Закарпатської області за період до 2050 року з використанням різних кліматичних моделей та сценаріїв. У дослідженні також використовувалися дані про адміністративно-територіальний поділ території, моніторинг ґрунтового покриву, аналіз рельєфу території, статистичні дані про стихійні лиха та соціально-економічний моніторинг розвитку регіону. Усі дані були структуровані на основі низки геопросторових баз даних.

Результатом використання ГІС є розробка математично обґрунтованих пропозицій щодо формування стратегії адаптації до змін клімату в Закарпатській області України на часовий горизонт до 2050 року на основі використання комплексу аналітичних засобів та геопросторових баз даних.

Ключові слова: Зміна клімату, Закарпатська область, Геоінформаційне моделювання, Стратегія.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference «Ecology. Human. Society» dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN (June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331368

THE STUDY OF CONSUMPTION PRACTICES AND ENVIRONMENTAL CONSCIOUSNESS AMONG THE STUDENTS UNDER THE EFFECT OF THE FAST FASHION TRENDS

Marharyta RADOMSKA[1], Nikita KLYMENKO[2]
[1]*State university "Kyiv Aviation Institute"*
Lyubomira Guzara Ave., 1, Kiev, 03058, Ukraine
[2]*Faculty of Environmental Protection*
Trg mladosti 7, 3320, Velenje, Slovenia
e-mail: m.m.radomskaya@gmail.com

Abstract

The work describes the environmental impacts of fast fashion, growing under the pressure of social media and popular culture. The survey among the students of the university showed a considerable effect of the fast fashion trends on young students, but the economic factors and traditions of rational use of personal items are still able to limit the practices of over-consumption. The recommendations for individual life style supporting sustainability in clothing purchasing and using were given.

Key words: *fast fashion, sustainable fashion, environmental impacts, consumption practices.*

Fast fashion is an economic strategy that involves the design, production, and marketing of clothing that is designed to quickly produce large quantities of clothing. The rise of social media and online shopping has fueled the demand for low-cost branded clothing, since consumers try to avoid repeating looks. They are driven by the desire to be on trend under the influence of constantly changing social media. At the same time, consumers expect clothing to be cheap, which leads to a disregard for the hard work that goes into making clothes. As consumer expectations continue to shape the industry landscape, more and more brands are forced to adopt the fast fashion model. However, this path leads to intensive environmental degradation and human exploitation.

The aim of this study was to investigate the practices of purchasing and using clothing among the students of Environmental Sciences Department as a prerequisite for the formation of their ecological footprint and to formulate a strategy for reducing their ecological footprint in this regard. An important peculiarity of the given research is that it was conducted among the students, which have taken the courses in Sustainable Development, Natural Resources Management and Environmental Performance assessment as a part of their professional education.

Most modern fashion companies use the fast fashion business model, which is characterized by speed, novelty, cost-effectiveness, and one-off trends that are constantly changing. This is possible thanks to lean and just-in-time approaches, and production is very often located in countries with cheap labor. Fast fashion regularly introduces new products for purchase. As a result, consumers increasingly perceive inexpensive clothing as fleeting, "almost disposable", which increases impulse

purchases and, as a result, leads to waste. In addition, by outsourcing production to underdeveloped countries, fashion companies benefit from a significant lack of strict laws and procedures governing the safety and health of workers. The quality of produced clothes gradually becomes not important, since it is not intended for a prolonged use. Sources and types of textiles are also diverting from safety and sustainability practices, because the main requirements are being appealing, cheap and quickly produced, which has nothing to do to environmental considerations.

Since fast fashion involves a constant increase in production volumes, there are many environmental problems that arise within its life cycle due to the excessive use of natural resources and the lack of effective practices for handling unsold goods.

Much of fashion's environmental impact is related to raw materials: cotton takes up about 2.5% of the world's agricultural land and requires significant amounts of water [1]. In contrast, synthetic materials such as polyester require an estimated 342 million barrels of oil each year and contribute to microplastic pollution [2], additionally clothing production processes need 43 million tons of chemicals per year for dyeing and textile treatment to repel oil and water from clothing [3]. These chemicals often include such hazardous components as heavy metals, ammonia, phthalates, and formaldehyde.

Carbon footprint of fast fashion is also incredibly high: it contributes 4-10% of all carbon emissions and this is expected to grow by 50% by 2030 [5].

The industry also uses a lot of water and generates huge amounts of waste: over 92 million tonnes of waste produced per year and 79 trillion liters of water consumed [4]. The fast fashion industry produces 100 billion garments and 92 million tons of waste each year, placing an additional burden on the environment, with 85% of textile waste ending up in landfills in the United States alone [7].

The fashion industry is also among the top polluters of the environment and produces 20% of all global wastewater [4]. Due to the lack of quality control and the need for rapid production in fast fashion [6], many factories lack the resources and time to effectively manage their wastewater, so these toxins end up in waterways.

A significant problem that exacerbates the environmental impacts is that fashion brands do not fully acknowledge their environmental impact, and therefore do not try to limit it, and even hide or mislead consumers with false and unfounded claims about their environmental friendliness in the form of greenwashing practices. And with the increasing pace of production in the pursuit of "fast fashion", all trends are only deepening. Under such conditions, it is extremely important to work with consumers to form sustainable consumption practices and, in particular, a commitment to "slow" fashion to push producers to more sustainable practices from the demand side.

To assess the depth of the problem, a survey was conducted among KAI students, which aimed to assess the following components of the problem:

1. Buying habits – the general patterns of buying clothes: where, how much, how often, and what factors drive the choice. This is a direct reflection of adherence to fast fashion trends.

2. Clothing management – how rationally purchased clothing is used (how often worn etc).

3. Origin of clothing – this block aims not to assess the level of awareness of students, but to establish whether this parameter is important for respondents in general and whether they are ready to implement circular principles in their personal lives.

60 people took part in the survey, representing students for the Bachelor program in Environmental Sciences in Kyiv Aviation Institute, Kyiv Aviation College and Faculty of Environmental Protection in Velenje, Slovenia. They were mainly young people aged 14 to 20, but there were also about 13 people over 40. The size of the sample was limited by the number of students taking courses, related to sustainability and sustainable consumption in all institutions. Accounting

the total number of students at the specialty Environmental Protection or Environmental Sciences in the institutions involved (202 students), the sampling error is within the 10% range.

The survey consisted of 12 multiple-choice questions.

According to the survey, most people shop in stores when they have money, but they only buy what they need. They hardly read fashion magazines and don't know where or how their clothes are made. Half of their clothes are second-hand. They know how to mend their clothes, but they don't do it. Unnecessary clothes are usually donated to charity or reused, very rarely thrown away. More than half have bought clothes and never worn them, and also have clothes that were used only once. The total number of items is a standard wardrobe. There were no significant differences between students form Ukrainian and Slovenian institution.

That is, we can conclude that fast fashion trends are present among students even after taking courses related to sustainability and responsible use of resources, but due to economic constraints, they have not gained such a scale as in Western countries. Low level of consciousness in relation to fast fashion was demonstrated in similar researches among secondary school students of Spain [8] and US college students [9]. Nevertheless, efforts should be directed at preventing the development of such consumer practices among young people, since with age they will have greater financial opportunities and they should be directed in a way that does not contribute to environmental degradation.

We can suggest a number of effective steps that everyone can implement in their lives to avoid participating in environmental destruction under the influence of the fashion industry:

- Stop buying fast fashion brands: this is the hardest, but most efficient action, since it calls for reforming their living practices. Instead, support sustainable fashion brands that uphold the principles of slow fashion. While these items may be more expensive, their higher quality ensures durability.
- Shopping at charity shops or second-hand stores has become an alternative to fast fashion. It is also a healthy practice to exchange clothes with friends or by arrangement through online platforms.
- Repair clothing items, which not only saves money, but also reduces dependence on fast fashion and minimizes waste.
- Recycling and finding ways to use old clothes to reduce the environmental impact of turning clothing into waste.
- Following your own views on clothing and style in general.

Thus, the survey of students demonstrated their commitment to "fast fashion", but at the same time they are rational about the things they have already purchased and are ready to give them a second life.

Given the active development and implementation of sustainable consumption strategies in the EU and, in particular, the adoption of regulations on eco-design of products, a broader survey and information campaign should be initiated in Ukraine to avoid environmental problems in the future.

References

1. Moazzem, S.; Crossin E.; Daver F., Wang L. Life Cycle Assessment of Apparel Consumption in Australia. *Environmental and Climate Technologies* **2021,** 25 (1): 71–111. https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0006

2. Periyasamy, AP; Tehrani-Bagha, A. A review on microplastic emission from textile materials and its reduction techniques. *Polymer Degradation and Stability* **2022**, *199*, 109901. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109901

3. Fang, B. Environmental and human impacts of fast fashion. *Communications in Humanities Research* **2023**, *15*, 166-171. https://doi.org/10.54254/2753-7064/15/20230660

4. Niinimäki, K.; Peters, G.; Dahlbo, H. *et al.* The environmental price of fast fashion. *Nat Rev Earth Environ* **2020,** *1*, 189–200. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9

5. Bailey, K.; Basu, A.; Sharma, S. The Environmental Impacts of Fast Fashion on Water Quality: A Systematic Review. *Water* **2022**, *14*, 1073. https://doi.org/10.3390/w14071073

6. Stenton, M.; Kapsali, V.; Blackburn, RS; Houghton, JA From Clothing Rations to Fast Fashion: Utilizing Regenerated Protein Fibers to Alleviate Pressures on Mass Production. *Energies* **2021**, *14*, 5654. https://doi.org/10.3390/en14185654

7. Zanjirani Farahani, R.; Asgari, N.; Van Wassenhove, L.N. Fast Fashion, Charities, and the Circular Economy: Challenges for Operations Management. *Production and Operations Management* **2022**, *31* (3), 1089-1114. https://doi.org/10.1111/poms.13596

8. Banos-González, I., Esteve-Guirao, P., Ruiz-Navarro, A., et al. Exploratory Study on the Competencies in Sustainability of Secondary School Students Facing Conflicts Associated with 'Fast Fashion'. *Education Sciences* **2024**, *14*(7), 694. https://doi.org/10.3390/educsci14070694

9. Su, J.; Chang, A. Factors affecting college students' brand loyalty toward fast fashion: A consumer-based brand equity approach", *International Journal of Retail & Distribution Management* **2018**, *46*(1), 90-107. https://doi.org/10.1108/IJRDM-01-2016-0015

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОЖИВАЦЬКИХ ПРАКТИК ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ СВІДОМОСТІ СЕРЕД СТУДЕНТІВ ПІД ВПЛИВОМ ТРЕНДІВ ШВИДКОЇ МОДИ

Маргарита РАДОМСЬКА
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 02000, Україна
https://orcid.org/0000-0002-8096-0313

Нікіта КЛИМЕНКО
Екологічний факультет Веленє
Trg mladosti 7, 3320, Velenje, Словенія
https://orcid.org/0009-0004-9983-1804

Анотація

У роботі описано вплив швидкої моди на навколишнє середовище, що розвивається під тиском соціальних мереж та популярної культури. Опитування серед студентів університету показало значний вплив тенденцій швидкої моди на молодь, але економічні чинники та традиції раціонального використання особистих речей все ще здатні обмежувати практику надмірного споживання. Надано рекомендації щодо індивідуального способу життя, що підтримує сталий розвиток у купівлі та використанні одягу.

Ключові слова: швидка мода, стала модна індустрія, вплив на навколишнє середовище, споживчі практики.

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331311

РАЦІОНАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ: НОВІ ПІДХОДИ ТА ПРАКТИКИ

Олена СОРОЧИНСЬКА
Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, 01010, Україна
e-mail: ellena06.84@ukr.net

Анотація: *Представлено оновлену концепцію управління відходами в умовах сучасних екологічних і соціально-економічних викликів. Новизна полягає в адаптації європейських практик до національних умов, розробці інтелектуальних WtE-ланцюгів постачання та акценті на ролі циркулярної економіки у відбудові країни. Особливу увагу приділено інституційним та інфраструктурним аспектам, а також аналізу потенціалу інтеграції WtE-рішень у стратегію енергетичної незалежності.*

Ключові слова*: управління відходами, стратегія, утилізація відходів, рециклінг, екологічна політика, сталий розвиток. циркулярна економіка.*

Проблема управління відходами є однією з ключових для забезпечення екологічної безпеки та збереження довкілля. Щорічне зростання обсягів твердих побутових, промислових, будівельних і небезпечних відходів потребує переосмислення традиційних підходів до їх збирання, переробки та утилізації. Сучасні виклики, пов'язані з урбанізацією, зміною клімату та обмеженістю природних ресурсів, спонукають до пошуку інноваційних, екологічно збалансованих та економічно ефективних рішень. У фокусі – **раціональне управління відходами,** що передбачає системний підхід до поводження з відходами на всіх етапах їх життєвого циклу: від утворення до повторного використання або утилізації.

Раціональне управління відходами в Україні потребує не лише технологічного переоснащення, а й комплексного перегляду нормативно-правової бази, участі громадськості та підготовки кваліфікованих кадрів. Успішні практики країн Європейського Союзу показують, що без системної взаємодії між державою, бізнесом та суспільством перехід до сталої моделі ресурсокористування є малоефективним.

Наразі важливим кроком є прийняття та реалізація **Національної стратегії управління відходами до 2030 року,** яка вже передбачає розвиток інфраструктури для обробки й утилізації відходів, а також заходи для запровадження принципів циркулярної економіки [2].

Сучасний підхід до управління відходами передбачає не лише їх утилізацію, а й ефективне використання як джерела енергії. Технологія перетворення відходів в енергію (Waste-to-Energy, WtE) дозволяє скорочувати кількість сміття, що підлягає захороненню, водночас виробляючи електроенергію, тепло або паливо. Це інноваційне рішення відповідає засадам сталої та циркулярної економіки, знижуючи екологічний тиск на довкілля. Такий підхід

набуває особливого значення в умовах інтенсивного зростання міст і підвищеного попиту на енергетичні ресурси [3].

WtE-технології включають кілька методів: спалювання з рекуперацією енергії, газифікацію, піроліз, анаеробне зброджування тощо. Вони дозволяють ефективно використовувати побутові, промислові та біологічні відходи, які не підлягають повторному використанню або рециклінгу. Зокрема, спалювання з рекуперацією дозволяє виробляти тепло для опалення житлових кварталів, а біогазові установки – отримувати метан із органічних відходів, що може використовуватись як паливо для транспорту чи генерації електроенергії [4].

Крім екологічних переваг, впровадження WtE-об'єктів має також економічну доцільність: зменшуються витрати на утилізацію відходів, створюються нові робочі місця, забезпечується енергетична автономія регіонів. Однак важливо враховувати потребу в суворому контролі за викидами та дотриманні європейських стандартів екологічної безпеки, аби уникнути вторинного забруднення повітря, ґрунтів та вод.

Інтелектуальне управління ланцюгом постачання в системі WtE (перетворення відходів на енергію) представлено на рисунку 1. Воно описується як розумна взаємодія між мешканцями, виробниками відходів, сортувальниками, збирачами та розповсюджувачами, які беруть участь у спеціалізованих процесах і виконують різні функції. Окрім домогосподарств, які генерують відходи в побуті, інші джерела відходів поділяються на категорії залежно від їхнього типу: сільське господарство, муніципальні служби, лісове господарство, комерційні підприємства, заклади охорони здоров'я, промисловість і будівельна галузь. Повний цикл управління охоплює всі етапи — від первинного збору до остаточної утилізації різнорідних відходів, що виникають у результаті виробництва товарів і надання послуг.

Рисунок 1. *Система управління ланцюгом постачання в технології перетворення відходів в енергію*

Система розумного управління ланцюгами постачання у сфері перетворення відходів в енергію (WtE) передбачає комплексний підхід до планування, моніторингу та оптимізації всіх етапів — від збору та транспортування сміття до виробництва енергії. Використання цифрових технологій, аналітики даних і автоматизованих рішень забезпечує підвищення ефективності, зменшення втрат ресурсів і гнучке реагування на зміну попиту. Такий інтелектуальний підхід

сприяє сталому розвитку та більш раціональному використанню наявних енергетичних і екологічних ресурсів [5].

Розумне управління ланцюгом постачання в системі перетворення відходів в енергію має бути гнучким і здатним адаптуватися до різних умов, що визначають рівень утворення та переробки відходів. Серед ключових чинників – темпи зростання населення, інтенсивність урбанізації, особливості клімату, рівень економічного розвитку тощо.

Кожна територія характеризується унікальним поєднанням демографічних, поведінкових, економічних, кліматичних і культурних параметрів. Це зумовлює різноманітність у кількості та типах відходів, що утворюються. Чим вищий рівень економіки, тим більше споживання – а отже, і відходів.

В українських реаліях WtE-технології можуть стати частиною "зеленої відбудови" після завершення війни. Масштабні руйнування інфраструктури створюють умови для впровадження інноваційних підходів до екологічного планування та енергозабезпечення. Використання відходів як ресурсу дозволить вирішити одразу декілька стратегічних проблем – від накопичення сміття до енергетичної незалежності та зменшення вуглецевого сліду.

Післявоєнне відновлення України супроводжується масовими обсягами будівельного сміття та залишків інфраструктури, які утворилися внаслідок збройних дій. Раціональне управління такими відходами передбачає створення спеціалізованих центрів їх сортування, переробки та повторного використання. Це дозволяє зменшити навантаження на полігони, зберегти природні ресурси та забезпечити будівельні матеріали для реконструкції. Зокрема, бетон, цегла, метал та інші інертні матеріали можуть бути перероблені для використання у відновленні доріг, житлових та громадських споруд.

Значну частину відходів від руйнувань, що не підлягають повторному використанню, можна інтегрувати у WtE-системи, де вони служитимуть джерелом теплової та електричної енергії для постраждалих громад (таблиця 1).

Таблиця 1. Основні етапи перетворення відходів в енергію

Етап	Зміст процесу	Приклади технологій	Отриманий результат
1. Збір	Організоване збирання твердих і будівельних відходів	Контейнери, мобільні пункти збору	Потоки відходів для переробки
2. Сортування та підготовка	Вилучення корисних фракцій, подрібнення залишків	Сортувальні лінії, подрібнювачі	Підготовлена сировина або паливо
3. Технологічна обробка	Перетворення відходів у тепло, біогаз або паливний газ	Спалювання з рекуперацією, анаеробне зброджування	Енергоносії: тепло, біогаз
4. Генерація енергії	Виробництво електроенергії або тепла	Турбіни, генератори, теплообмінники	Електроенергія та гаряча вода
5. Повторне використання побічних продуктів	Використання золи, шлаків або компосту	Очистка, стабілізація	Будматеріали, добрива, зменшення відходів

Це забезпечить додатковий ресурс у перехідний період, зменшить залежність від імпортних енергоносіїв і сприятиме розвитку децентралізованої енергетики. Інтеграція таких рішень повинна супроводжуватись дотриманням екологічних норм і стандартів ЄС, а також включенням громадськості до процесу ухвалення рішень.

Розбудова нової інфраструктури в постраждалих регіонах України відкриває унікальну можливість переосмислити системи управління відходами та впровадити новітні екотехнології з самого початку (рис. 2). У післявоєнний період раціональне поводження з відходами має стати складовою частиною ширшої стратегії сталого відновлення: від відновлення міст і сіл із застосуванням перероблених матеріалів до створення локальних WtE-об'єктів, які забезпечуватимуть потреби громад в енергії. Такий підхід дозволить водночас вирішити проблему накопичення сміття, сприятиме відновленню економіки, зменшенню вуглецевого сліду та досягненню енергетичної незалежності на регіональному рівні.

Рисунок 2. *Структурна схема поводження з відходами від руйнації*

Раціональне управління відходами, з урахуванням сучасних викликів та потреб України у післявоєнний період, потребує інтеграції новітніх технологій, європейських практик та інтелектуальних рішень у сфері WtE. Такий підхід дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження та обсяги захоронення сміття, а й сприяє створенню ефективної енергетичної інфраструктури, відновленню економіки та підвищенню якості життя населення. Успішна реалізація цієї стратегії стане основою для сталого розвитку та інтеграції України в європейське екологічне середовище.

Роботу підготовлено на основі раніше опублікованих матеріалів автора [1], із врахуванням нових даних, сучасних технологічних рішень та аналітичних уточнень, що стосуються післявоєнного відновлення України та впровадження WtE-рішень.

Література

1. Сорочинська О.Л. Інноваційні підходи до управління відходами в контексті сталого розвитку. *Екологічні науки* № 1(58) - 2025. - С. 330-335
2. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. – 2017.https://mepr.gov.ua
3. Європейська Комісія. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. – Official Journal of the European Union, L 312, 22/11/2008.
4. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. – World Bank Group. https://openknowledge.worldbank.org
5. Данчук В. Г., Стеценко Т. О. Енергія зі сміття: потенціал використання технологій WtE в Україні // Енергетика та довкілля. – 2022. – №4. – С. 34–39.

RATIONAL WASTE MANAGEMENT: NEW APPROACHES AND PRACTICES

Olena SOROCHYNSKA
National Transport University
Omelianovycha-Pavlenka str. 1, 01010, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-2477-1275

Abstract: The paper addresses current challenges and strategic directions for the development of the waste management system in Ukraine, particularly in the context of post-war recovery. Emphasis is placed on the necessity of transitioning to environmentally oriented and sustainable waste management models, taking into account the experience of EU countries. The core theme of the study is the implementation of circular economy concepts and waste-to-energy (WtE) technologies as a pathway to ecological modernization and energy independence. It is noted that effective waste management should be based on legislative reforms, technical upgrades, educational initiatives, and broad public engagement. Innovative solutions, particularly intelligent WtE supply chains, should consider regional characteristics and socio-economic factors. The study highlights the importance of an integrated approach to waste handling as a prerequisite for sustainable development and Ukraine's European integration.

Key words waste management, strategy, waste disposal, recycling, environmental policy, sustainable development, circular economy

Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315
https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331311

ENVIRONMENTAL ISSUES RELATED TO AUTOMOBILE TRANSPORT

Arsenii KHATSEI, Inna TRUS
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Beresteiskyi Avenue, 37, 03056, Kyiv, Ukraine
e-mail: xatsey12@gmail.com

Abstract

Automobile transport is one of the major sources of anthropogenic impact on the environment in the modern world. Its rapid growth causes numerous environmental problems that affect all components of the environment – the atmosphere, hydrosphere, lithosphere, biota, as well as the climate and human health. This paper examines the main negative consequences of transport operations, including greenhouse gas emissions (CO2, CH4, NOx), smog formation, soil contamination with heavy metals, microplastic pollution in water bodies, wildlife mortality, and disruption of ecological connections. Special attention is paid to the impact on public health, particularly the development of respiratory, cardiovascular, and oncological diseases. The problem of urban consequences, such as noise pollution and the degradation of urban spaces, is also highlighted. The role of transport in climate change and global warming is assessed. Mitigation strategies are proposed, including the transition to electric vehicles, the development of public transport, reducing car dependency, and ecological urban planning with the creation of parking spaces. This study has practical significance for shaping modern transport policies in the context of sustainable development.

Key words: *automobile transport, pollution, environment, sustainable development, parking.*

Relevance of the Topic

Considering the rapid growth in the number of cars worldwide, the environmental impact of automobile transport is becoming increasingly significant. Automobiles are the primary source of greenhouse gas emissions in cities, as well as producers of a range of harmful substances, including nitrogen oxides, carbon monoxide, sulfur compounds, particulate matter, and volatile organic compounds. These pollutants significantly degrade air quality, leading to increased rates of respiratory and cardiovascular diseases among the population. In addition, automobile transport pollutes soils and water resources through the runoff of petroleum products, heavy metals, microplastics, and chemical reagents. The destruction of natural habitats, noise pollution, and the deterioration of biodiversity are additional challenges that require comprehensive solutions. In the context of global climate change, the environmental impact of automobile transport takes on a planetary scale. Therefore, studying the ecological consequences of automobile transport is highly relevant for shaping effective environmental policies, developing sustainable cities, and implementing technologies aimed at reducing environmental burdens [1].

Research Objective

The purpose of the study is a comprehensive analysis of the environmental problems caused by the operation of automobile transport, with a focus on its impact on the main components of the environment – the atmosphere, hydrosphere, lithosphere, biota, climate, and human health [2].

Scientific Novelty

The scientific novelty of the work lies in the comprehensive consideration of the impact of automobile transport on all components of the environment simultaneously, allowing for a holistic assessment of the scale of environmental impact. The study systematizes various types of impacts and proposes approaches to reducing negative consequences based on the principles of sustainable development.

Research results

The most obvious consequence of automobile transport activities is air pollution. In megacities, the share of transport in overall air pollution reaches 80%. The problem is exacerbated by an aging vehicle fleet, low fuel quality, and congested roads.

Automobile transport pollutes water bodies in two main ways: surface runoff from roads: petroleum products, heavy metals (Pb, Zn, Cd), and brake fluids enter water bodies with rainwater and meltwater, and oil spills: accidents and maintenance cause leakage of oils and fuels, which migrate into groundwater and surface waters. Fuel and lubricants are toxic to aquatic flora and fauna, reduce biodiversity, and disrupt the self-purification processes of water ecosystems.

Automobile transport has both direct and indirect impacts on soils: Pollution with heavy metals – cadmium, lead, copper, and nickel accumulate in the topsoil near roads. Salinization – due to the use of de-icing agents for road maintenance during the winter period. Physical degradation of soils – compaction, erosion, and changes in the hydrological regime during the construction of road infrastructure. These processes reduce soil fertility, decrease ecosystem productivity, and accelerate landscape degradation [3].

Transport has a negative impact on living organisms. Direct destruction of animals – millions of individuals die on the roads every year. Noise pollution – disrupts migration routes and communication in animals. Habitat fragmentation – road construction divides ecosystems, complicating genetic exchange between populations. Emission toxicity – disrupts metabolic processes in plants, reduces photosynthesis, and decreases the viability of biocenoses.

Motor transport directly affects the quality of life and health. According to the WHO, about 4.2 million people die prematurely each year from diseases related to air pollution. Chronic diseases such as asthma, cardiovascular, and nervous system diseases are more frequently diagnosed in cities with heavy traffic. Noise impact causes stress, sleep disturbances, and reduced cognitive abilities in children.

Automobile transport is one of the key sources of greenhouse gas emissions. On a global scale, transport accounts for about 15 % of all CO_2 emissions. The increase in the number of cars and the consumption of fossil fuels intensify global warming, rising sea levels, and extreme weather events.

In cities, transport creates other types of environmental impact. Land occupation – up to 40 % of the central part of a city can be occupied by transport infrastructure (fig. 1). Smog and heat islands – temperature increases in cities by 3–5°C compared to the outskirts [4].

To reduce the environmental impact of transport, it is necessary to: transition to electric vehicles and hybrids; develop public transport and cycling infrastructure; implement Euro-6 and higher

environmental standards; ban diesel transport from city centers; encourage carpooling; create green corridors for biota within infrastructure.

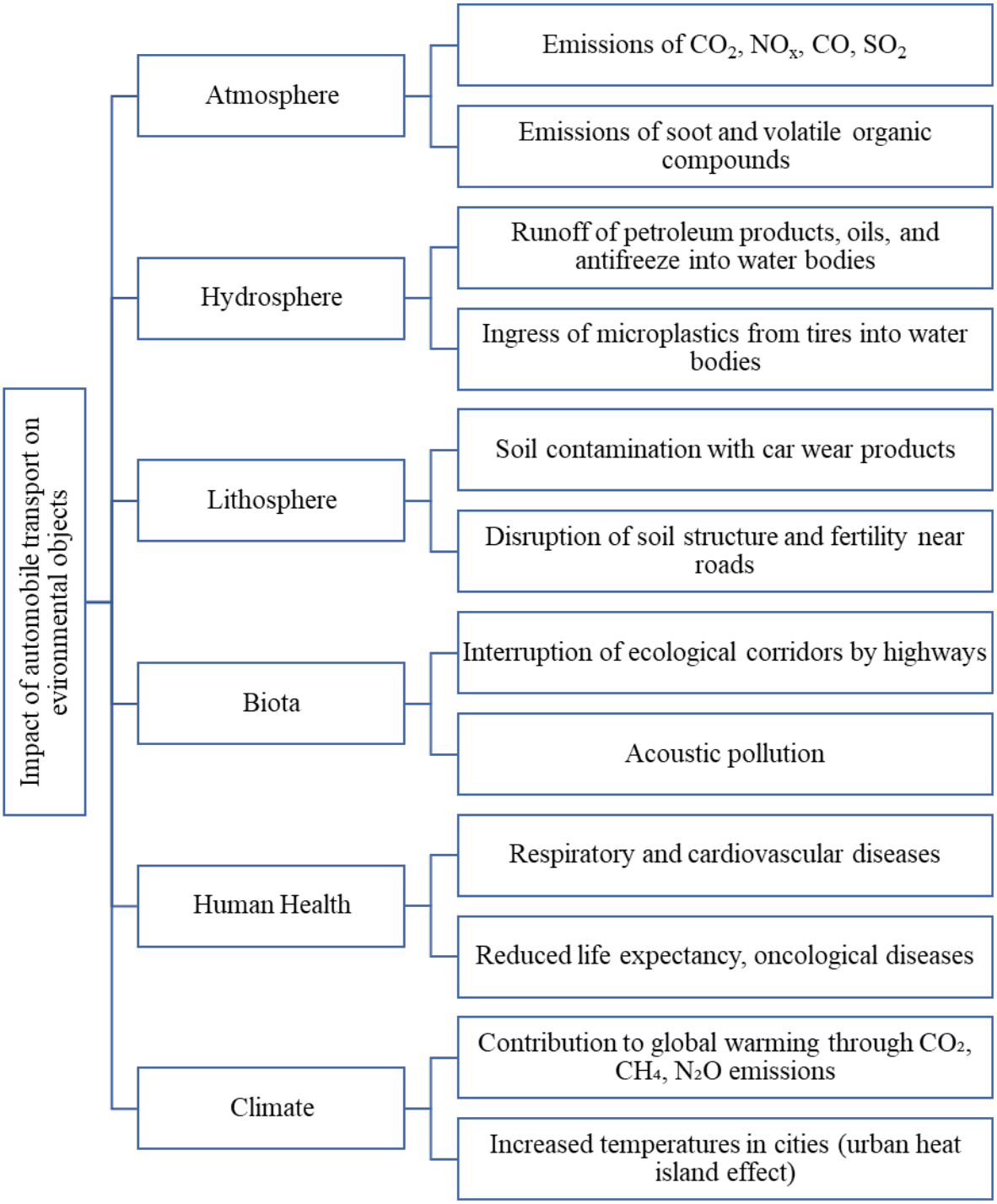


Figure 1. *Pollution by automobile transport*

Automobile transport is a source of many environmental problems – from air and water pollution to climate change and biodiversity loss. To minimize the negative impact, a comprehensive approach is needed: legislative regulation, development of alternative transport, public education, and

modernization of urban environments. Only a sustainable transport system can ensure a balance between mobility, the economy, and the environment.

Conclusions

As a result of the conducted research, it was established that automobile transport is one of the most significant factors of anthropogenic impact on the environment. Its operation causes a multi-level negative impact on the atmosphere, soils, water resources, living organisms, climate, and human health. The main environmental threats include the emission of harmful substances, pollution with heavy metals, microplastics, and the formation of noise and thermal pollution.

The intensification of global environmental and climate problems requires the implementation of comprehensive measures to green the transport sector. These include the development of public transport, the promotion of electric vehicle use, the introduction of stricter emission standards, the planning of green corridors, and the integration of sustainable development principles into transport policy. Thus, minimizing the negative impact of automobile transport on the environment is possible only under the conditions of an interdisciplinary approach, combining technological innovations, management decisions, and active public participation [5].

Recommendations for further applied research

To further reduce the environmental impact of automobile transport, it is recommended to focus on the development and implementation of Park-and-Ride (P+R) facilities. These facilities serve as strategically located parking areas on the outskirts of cities, where drivers can park their cars and continue their journey using public transportation. Park-and-Ride systems are designed to decrease traffic congestion in urban centers, reduce emissions from private vehicles, and promote the use of sustainable public transport options.

References

1. Arkhipova H.; Tkachuk I.; Hlushkov Ye. Analiz vplyvu vidpratsovanykh avtomobilnykh haziv na stan atmosfernoho povitria v hustonaselenykh raionakh. **2011**, 1, 78. https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/519

2. Bakulich O.; Samoilenko Ye. Assessment of air pollution in cities by road transport in projects for managing the metropolis ecological state. **2021**, 26, 125. https://nonproblem.net/article/26-2021-13

3. Ieremenko O.; Zubok T.; Nesukai M. Osoblyvosti zabrudnennia atmosfery avtotransportom v urbanizovanomu seredovyshchi. **2022**, 68. https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=BfAP4PwAAAAJ&citation_for_view=BfAP4PwAAAAJ:IWHjjKOFINEC

4. Sipakov R.; Voloshkina O.; Bereznecka Yu.; Klimova I. Otsinka ryzyku dlia zdorovia naselennia vid vykydiv avtomobilnoho transportu u m. Kyievi. **2018**, 1, 45. http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/6392

5. Tkachuk L.; Boreiko V. Problema zabrudnennia atmosfernoho povitria avtomobilnym transportom u Kyievi ta shliakhy yii vyrishennia. **2009**, 5, 122. https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/11978/1/Tkachiuk.pdf

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ

Арсеній ХАЦЕЙ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0006-9809-8932.

Інна ТРУС
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6368-6933.

Анотація

Автомобільний транспорт є одним із головних джерел антропогенного впливу на довкілля в сучасному світі. Його стрімке зростання спричиняє численні екологічні проблеми, що охоплюють усі компоненти навколишнього середовища – атмосферу, гідросферу, літосферу, біоту, також впливають на клімат та здоров'я людини. У роботі розглянуто основні негативні наслідки функціонування транспорту, серед яких викиди парникових газів (CO_2, CH_2, NO_x), формування смогу, забруднення ґрунтів важкими металами, потрапляння мікропластику у водойми, загибель диких тварин і порушення екологічних зв'язків. Особливу увагу приділено впливу на здоров'я населення, зокрема розвитку респіраторних, серцево-судинних та онкологічних захворювань. Окремо висвітлено проблему урбаністичних наслідків, таких як шумове забруднення та деградація міського простору. Оцінено роль транспорту в зміні клімату та глобальному потеплінні. Запропоновано напрямки пом'якшення негативного впливу – перехід до електромобілів, розвиток громадського транспорту, зменшення автозалежності та екологічне планування міст, створення паркінгів. Робота має практичне значення для формування сучасної транспортної політики в контексті сталого розвитку.

Ключові слова: автомобільний транспорт, забруднення, навколишнє середовище, сталий розвиток, паркінг.

1998

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО СТУДЕНТІВ ТА АСПІРАНТІВ НТУУ «КПІ»

ЗБІРКА ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ УЧАСНИКІВ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ «ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. СУСПІЛЬСТВО»
(21 травня 1998 р. м. Київ)

НТУУ «КПІ»
1998 р.

1998