

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ





НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ  
«ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ»

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

## №7, 2025

### НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у 2019 році

Виходить 2 рази на рік

#### Редакційна колегія:

Головний редактор

**Улицький Олег Андрійович**  
Доктор геологічних наук

Науковий редактор

**Машков Олег Альбертович**  
Доктор технічних наук

#### Редакційна колегія:

<b>Гудков Д. І.</b>	Доктор біологічних наук
<b>Дудар Т. В.</b>	Доктор технічних наук
<b>Єрмаков В. М.</b>	Доктор технічних наук
<b>Ісаєнко В. М.</b>	Доктор біологічних наук
<b>Кватернюк С. М.</b>	Доктор технічних наук
<b>Ліханов А. Ф.</b>	Доктор біологічних наук
<b>Лукашов Д. В.</b>	Доктор біологічних наук
<b>Луньова О. В.</b>	Доктор технічних наук
<b>Мадже С. М.</b>	Доктор технічних наук
<b>Маркіна Л. М.</b>	Доктор технічних наук
<b>Міхеев О. М.</b>	Доктор біологічних наук
<b>Ольховик Ю. О.</b>	Доктор технічних наук
<b>Павличенко А. В.</b>	Доктор технічних наук
<b>Петрук В. Г.</b>	Доктор технічних наук
<b>Петрук Р. В.</b>	Доктор технічних наук
<b>Проскурнін О. А.</b>	Доктор технічних наук
<b>Риженко Н. О.</b>	Доктор біологічних наук
<b>Степова О. В.</b>	Доктор технічних наук
<b>Фролов В. Ф.</b>	Доктор технічних наук
<b>Шматков Г. Г.</b>	Доктор біологічних наук

Літературний редактор (англійська мова)

**Іващенко Катерина Тарасівна**

Відповідальний редактор, науковий співробітник

**Гуленко Олена Борисівна**

#### ЗАСНОВНИК:

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

Науковий парк «ЧОРНОБИЛЬ»

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

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

ISSN: 2707-7993

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

Рекомендовано до друку науково-технічною радою  
Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Технології  
захисту довкілля»». Підписано до друку 14.01.2025 р.

Адреса редакції:

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

Тел: +380980625787

(контактна особа-Печений Володимир)

Електронна скринька: [Corporation\\_office@ukr.net](mailto:Corporation_office@ukr.net)

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

Видавництво ТОВ «Основа»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи

до Державного реєстру видавців

ДК №1981 від 21.10.2004 р.

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

Тел.: (044) 584-38-97, 584-38-95(96).

Формат 60x84/8

Наклад 100 прим.

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

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

Відповідальність за добір і викладення фактів несуть автори.

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

## ЗМІСТ

<b>ВАЛЕРКО Р. А., БОНДАРЧУК В. М. КІРЕЙЦЕВА Г. В.</b>	ГІДРОХІМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ РІЧКИ ТЕТЕРІВ У МЕЖАХ ПИТНОГО ВОДОЗАБОРУ МІСТА ЖИТОМИР	<b>3</b>
<b>ДЕМЧУК Л. І., РУСЕЦЬКА Н. М.</b>	УТИЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ ЯК АСПЕКТ ЕКОЛОГІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ	<b>12</b>
<b>МОЖАРІВСЬКА І. А. КРАВЧУК-ОБОДЗІНСЬКА Т. В. УСТИМЕНКО В. І., КОВАЛЬОВА С. П.</b>	ВПЛИВ БОЙОВИХ ДІЙ НА СТАН ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ	<b>21</b>
<b>ФІЛІН В. В. МАРКІНА Л. М.</b>	НАУКОВИЙ ПІДХІД У СТВОРЕННІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОДУКТУ	<b>27</b>
<b>ГЕРАСИМЧУК Л. О. РИБАК О. С.</b>	ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗЕЛЕНИХ ДАХІВ У ПОГЛИНАННІ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК PM2.5 ТА PM10 В УМОВАХ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА	<b>36</b>
<b>ІВАЩЕНКО Т. Г. РИЖОВ Г. О.</b>	АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ЗАКОНОДАВЧОЇ БАЗИ ЩОДО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ БУРІННЯ ПРИ СПОРУДЖЕННІ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ВИДОБУВАННЯ НАФТИ ТА ГАЗУ	<b>43</b>
<b>ПАЦЕВА І. Г. МЕДВІДЬ О. В.</b>	СТРАТЕГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ ВПРОВАДЖЕННЯ МОНІТОРИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ВИДОБУТКУ ГРАНІТУ: SWOT ТА PEST-АНАЛІЗ	<b>50</b>
<b>МАШКОВ О. А. ПЕЧЕНИЙ В. Л. ПРИСЯЖНИЙ В. І. ОВОДЕНКО Т. С.</b>	ПОНЯТІЙНИЙ АПАРАТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОГЕННЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	<b>58</b>
<b>УЛИЦЬКИЙ О. А., Д'ЯЧЕНКО Н. О. ПАШКЕВИЧ Л. П., ГОЛОВАЧ А. Г.</b>	ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ВОДНОЇ ЕКОСИСТЕМИ В НИЖНІЙ ЧАСТИНІ РІЧКИ ДНІПРО В СУЧАСНИХ УМОВАХ	<b>65</b>
<b>RADOMSKA M. M. HUZ V. V.</b> <i>Стаття англійською мовою</i>	PROTECTING URBAN BIODIVERSITY BY DEVELOPING URBAN ECO- NETWORKS	<b>76</b>
<b>KOTSIUBYNSKYI A. O. HRYTSULYAK H. M. YATSYSHYN T. M., LYNNYK D. O.</b> <i>Стаття англійською мовою</i>	IMPACT OF SPACE LAUNCHES ON THE ENVIRONMENT	<b>84</b>
<b>МАРКІНА Л. М., ІВАЩЕНКО Т. Г., ВЛАСЕНКО О. В.</b>	МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ОХОЛОДЖУВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ РЕАКТОРА ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗУ	<b>92</b>
<b>МАШКОВ О.А. МАРКІКА Л.М. ПРИСЯЖНИЙ В.І. ОВОДЕНКО Т.С.</b>	ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЗІ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОЦІНКИ ТРАНСКОРДОННИХ ЕКОЛОГІЧНИХ КОНФЛІКТІВ	<b>104</b>
<b>LESIA PAVLIUKH VICTOR REPETA</b> <i>Стаття англійською мовою</i>	COMPARATIVE ANALYSIS OF PHOTOBIOREACTOR DESIGNS FOR MICROALGAE CULTIVATION	<b>114</b>
<b>МАРКІНА Л. М., ГРОМОВА І. Ю., ПЕЧЕНИЙ В. Л., ШЕВЧЕНКО О. Є.</b>	ПРОЯВИ ЕКОЦИДУ В СУЧАСНІЙ ВІЙНІ В УКРАЇНІ	<b>122</b>
<b>МАРКІНА Л. М., КОВАЛЕНКО Д. В.</b>	ВНУТРІШНЬОЦИКЛОВА ГАЗИФІКАЦІЯ: ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ	<b>133</b>

УДК 556.3:628.1 (477.42)

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-01>

## ГІДРОХІМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ РІЧКИ ТЕТЕРІВ У МЕЖАХ ПИТНОГО ВОДОЗАБОРУ МІСТА ЖИТОМИР

Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Кірейцева Г. В.  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005  
*valerko\_ruslana@ukr.net,*  
*kvm\_bvm@ztu.edu.ua*

Гідрохімічний стан річки Тетерів є визначальним фактором екологічної безпеки та якісного питного водопостачання міста Житомир. У межах дослідження проведено комплексний аналіз гідрохімічних показників води річки Тетерів у межах питного водозабору м. Житомир за період 2000-2024 років на основі отриманих даних моніторингу Басейнового управління водних ресурсів річки Прип'ять (далі – БУВР). Було проаналізовано динаміку таких показників як: біохімічне споживання кисню (БСК<sub>5</sub>), розчинений кисень, завислі речовини, сульфати, хлориди, фосфати, нітрати та нітрити.

Дослідження базується на даних «Звітів загального користування» Державного агентства водних ресурсів України (далі – Держводагентство) та результатах моніторингу БУВР Прип'яті. Для аналізу динаміки показників було застосовано поліноміальні тренди різних ступенів з оцінкою величини вірогідності апроксимації. Особливу увагу приділено виявленню сезонних коливань та відхилень від нормативних значень, встановлених для водойм питного призначення.

Результати дослідження показали, що показник БСК<sub>5</sub> коливався в межах 2,08–7,22 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, причому середні значення відповідали нормативу ( $\leq 3$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) лише у 2011, 2012, 2014 та 2015 роках. Вміст розчиненого кисню знаходився у межах 6,0–14,56 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, що відповідало нормативним вимогам ( $\geq 4,0$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>). Вміст завислих речовин не перевищував нормативів, за винятком періоду березня 2003 року (17 мг/дм<sup>3</sup>, що у 1,13 рази більше норми).

Середній вміст сульфатів знаходився у межах 22–87 мг/дм<sup>3</sup>, що не перевищувало встановлену норму (100 мг/дм<sup>3</sup>). Концентрація хлоридів варіювала від 9,4 до 81,5 мг/дм<sup>3</sup>, залишаючись нижче допустимого рівня (300 мг/дм<sup>3</sup>). Вміст фосфатів у воді становив 0,028–0,105 мг/дм<sup>3</sup>, що значно нижче допустимого значення (0,7 мг/дм<sup>3</sup>).

Концентрація азоту амонійного, у деякі роки перевищувала нормативні значення ( $\leq 0,5$  мг/дм<sup>3</sup>): у 2000 році – у 1,11 раза, у 2001 – у 1,07 раза, у 2004 – у 1,14 раза, у 2005 – у 1,4 раза, у 2006 – у 1,08 раза. Вміст нітратів варіював у межах 1,9–3,3 мг/дм<sup>3</sup>, що не перевищувало нормативні показники. Вміст нітритів у воді зафіксовано у межах 0,001–0,20 мг/дм<sup>3</sup>, причому у 2,96% випадків перевищено допустиму норму (0,02 мг/дм<sup>3</sup>).

Отримані результати підтверджують необхідність посилення системного моніторингу та реалізації заходів щодо покращення якості води у питному водозаборі м. Житомир. Проведений аналіз може бути використаний для розроблення екологічних програм, оптимізації методів очищення води та забезпечення сталого водопостачання.

**Ключові слова:** гідрохімічний моніторинг, річка Тетерів, питний водозабір, якість води, екологічна безпека, водопостачання, забруднення.

**Hydrochemical Monitoring of the Teteriv River Within the Drinking Water Intake Area of Zhytomyr.** Valerko R. A., Bondarchuk V. M., Kireitseva H.V.

The hydrochemical state of the Teteriv River is a crucial factor in the environmental safety and quality of drinking water supply for the city of Zhytomyr. This study presents a comprehensive analysis of the hydrochemical parameters of the Teteriv River's water within the Zhytomyr drinking water intake area for the period 2000–2024, based on monitoring data from the Pripjat Basin Water Resources Management (BUVR). The study examined the dynamics of such indicators as biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), dissolved oxygen, suspended solids, sulfates, chlorides, phosphates, nitrates, and nitrites.

The study is based on 'Public Reports' from the State Water Resources Agency of Ukraine and monitoring results from the Pripjat Basin Water Resources Management. Polynomial trends of various degrees with assessment of approximation reliability were used to analyze the dynamics of indicators. Special attention was paid to identifying seasonal fluctuations and deviations from regulatory values established for drinking water reservoirs.

The research findings indicate that the BOD<sub>5</sub> levels ranged from 2.08 to 7.22 mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>, with average values meeting the regulatory standard ( $\leq 3$  mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>) only in 2011, 2012, 2014, and 2015. Dissolved oxygen levels were within 6.0–14.56 mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>, conforming to the regulatory requirements ( $\geq 4.0$  mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>). The content of suspended solids did not exceed the standards, except for March 2003 (17 mg/dm<sup>3</sup>, which exceeded the norm by 1.13 times).

The average sulfate concentration ranged from 22 to 87 mg/dm<sup>3</sup>, remaining below the established limit (100 mg/dm<sup>3</sup>). Chloride levels varied between 9.4 and 81.5 mg/dm<sup>3</sup>, staying within the permissible level (300 mg/dm<sup>3</sup>). The concentration of phosphates in water was 0.028–0.105 mg/dm<sup>3</sup>, significantly below the allowable limit (0.7 mg/dm<sup>3</sup>).

Ammonium nitrogen concentration exceeded the regulatory values ( $\leq 0.5$  mg/dm<sup>3</sup>) in certain years: in 2000 by 1.11 times, in 2001 by 1.07 times, in 2004 by 1.14 times, in 2005 by 1.4 times, and in 2006 by 1.08 times. Nitrate levels varied from 1.9 to 3.3 mg/dm<sup>3</sup>, staying within regulatory limits. Nitrite concentrations ranged from 0.001 to 0.20 mg/dm<sup>3</sup>, with 2.96% of cases exceeding the permissible limit (0.02 mg/dm<sup>3</sup>).

The obtained results confirm the necessity of strengthening systematic monitoring and implementing measures to improve water quality

in the Zhytomyr drinking water intake area. The conducted analysis can be used for developing environmental programs, optimizing water purification methods, and ensuring sustainable water supply.

**Keywords:** hydrochemical monitoring, Teteriv River, drinking water intake, water quality, environmental safety, water supply, pollution.

## Постановка проблеми

Гідрохімічний стан річки Тетерів має вирішальне значення для екологічної безпеки та якості питного водопостачання міста Житомир. В умовах сучасного техногенного розвитку, стрімкої урбанізації та активного сільськогосподарського використання водних ресурсів річки, зростає ризик її хімічного забруднення. Основними факторами, що впливають на якість води у межах питного водозабору, є: антропогенне навантаження, агрохімічне забруднення, кліматичні зміни та природні фактори [1].

Відсутність належного контролю за гідрохімічними параметрами може призвести до поступового погіршення якості води, що безпосередньо вплине на стан здоров'я населення та функціонування системи централізованого водопостачання [2].

## Актуальність дослідження

Загальновідомо, що прісна вода є критично важливим ресурсом для всього світу, а її якість безпосередньо впливає на здоров'я населення.

Зростання потреб у водних ресурсах спричиняє значний вплив на водний баланс, функціонування екосистем та суспільний розвиток [3, 4].

У зв'язку з цим проблеми раціонального водокористування стають першочерговими для багатьох країн, оскільки вони визначають рівень екологічної, економічної та продовольчої безпеки. Крім того, доступність якісних водних ресурсів є важливим чинником сталого розвитку територій.

В Україні основним джерелом водопостачання є поверхневі води, які нині зазнають значного забруднення та виснаження, що часто не

дозволяє використовувати їх відповідно до санітарних норм [5, 6]. Попри критичний стан водних ресурсів, заходи з їхнього відновлення та фінансування програм щодо покращення якості води здійснюються недостатньо [7, 8]. Крім того, незважаючи на значний спад нинішнього промислового виробництва, проблема забруднення водних ресурсів залишається досить актуальною [9, 10].

Попередні дослідження показують наявність тенденції до погіршення якості води, що може нести потенційні ризики для здоров'я населення та функціонування системи водопостачання. Однак, системний моніторинг хімічного складу води у межах питного водозабору м. Житомир потребує поглибленого аналізу з метою визначення динаміки змін, виявлення основних джерел забруднення та розроблення ефективних заходів для покращення ситуації що склалася.

Проведення системного гідрохімічного моніторингу дозволить виявити динаміку змін складу води, оцінити рівень забруднення та своєчасно вжити заходи для запобігання екологічним ризикам. Оскільки р. Тетерів є основним джерелом питного водопостачання для міста, отриманні результати дослідження будуть корисними для місцевих органів влади, підприємств водопостачання та природоохоронних організацій.

## Мета роботи

Метою дослідження є проведення комплексного гідрохімічного моніторингу р. Тетерів у межах питного водозабору м. Житомир для виявлення основних забруднюючих речовин та факторів, що впливають на її хімічний склад.

## Викладення основного матеріалу

Інформаційною базою наукового дослідження стали «Звіти загального користування» Держводагентства. Для дослідження були використані дані моніторингу БУВР Прип'яті за період 2000–2024 роки [10]. За досліджуваний період було оцінено динаміку таких гідрохімічних показників: біохімічного споживання кисню (БСК5), розчиненого кисню, завислих речовин, сульфатів, хлоридів, фосфатів, нітратів та нітритів.

Показник БСК5 у воді питного водозабору м. Житомир за досліджуваний період 2000–2024 рр. знаходився на рівні 2,08–7,22 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Середні значення у межах нормативу (3 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) зафіксовані лише у 2011, 2012, 2014 та 2015 роках. Загалом же середній вміст БСК5 описується поліноміальним трендом 5-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,4048$  (рис. 1).

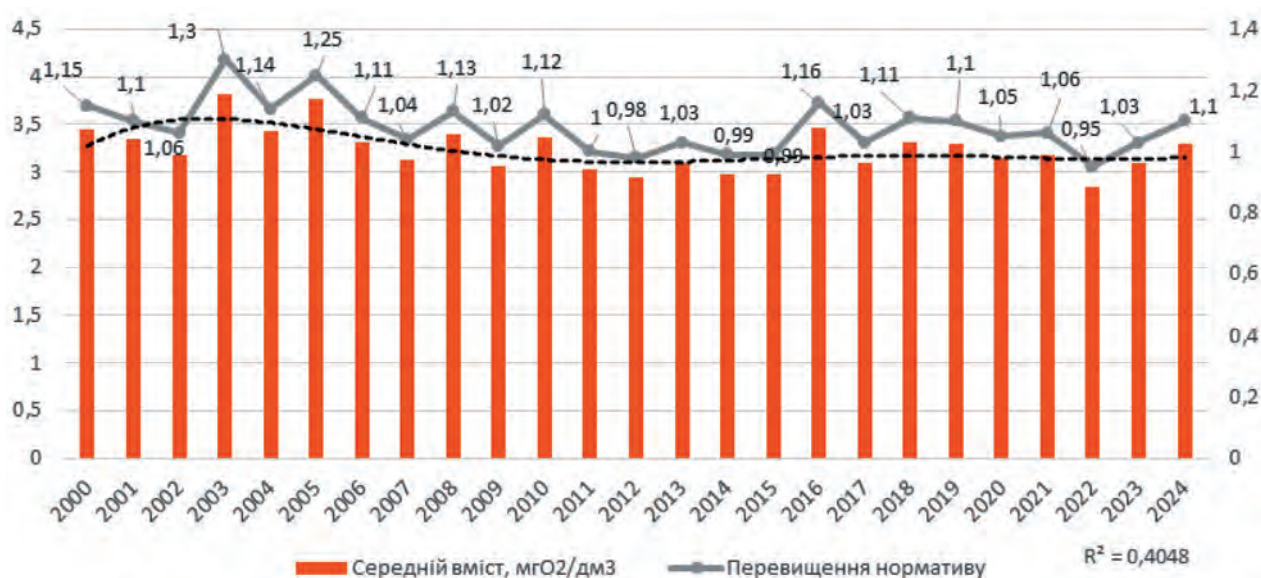


Рисунок 1. Динаміка середнього вмісту та перевищення нормативу БСК5 у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр.

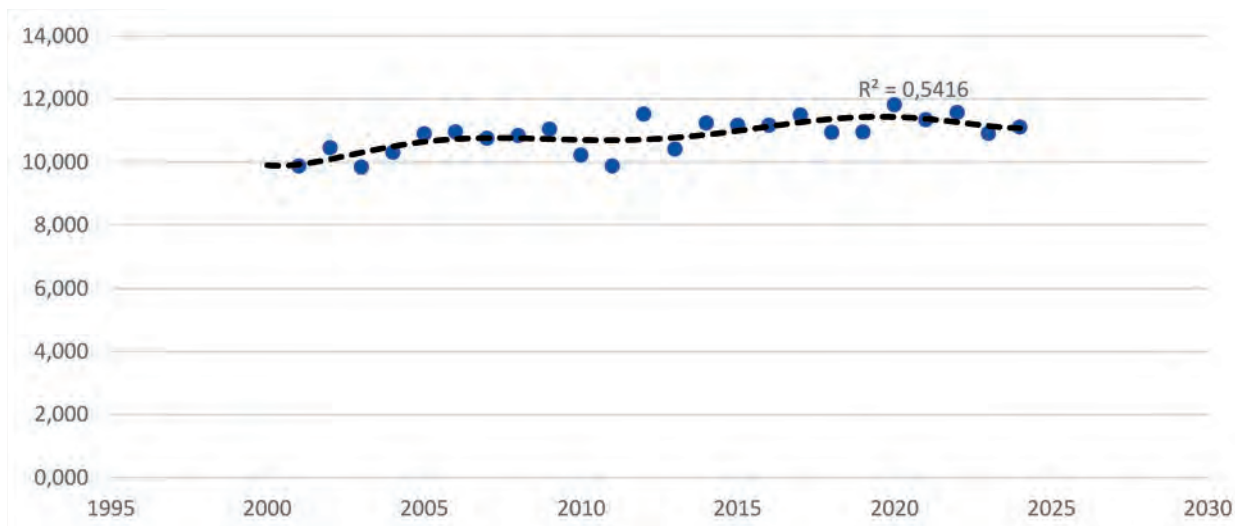


Рисунок 2. Динаміка середнього вмісту розчиненого кисню у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр., мгО<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup>

Вміст розчиненого кисню протягом досліджуваного періоду знаходився на рівні від 6,0 до 14,56 мгО<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup>, що відповідає нормі (не нижче 4,0 мгО<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup>). Середній вміст розчиненого кисню описується поліноміальним трендом 6-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,5416$  (рис. 2).

Динаміка середнього вмісту завислих речовин у питному водозаборі м. Житомир протягом 2000–2024 років зображена на рисунку 3. Перевищень нормативу вмісту завислих речовин, за

досліджуваній період, не виявлено. Виключення склав лише березень 2003 р., коли значення показника знаходилося на рівні 17 мг/дм<sup>3</sup> та перевищувало норматив у 1,13 разів. Середній вміст суспендованих речовин описується поліноміальним трендом 4-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,3992$ .

Середній вміст сульфатів у воді протягом 2000–2024 рр., знаходився у межах від 22 до 87 мг/дм<sup>3</sup> і не перевищував встановлену норму 100 мг/дм<sup>3</sup>.

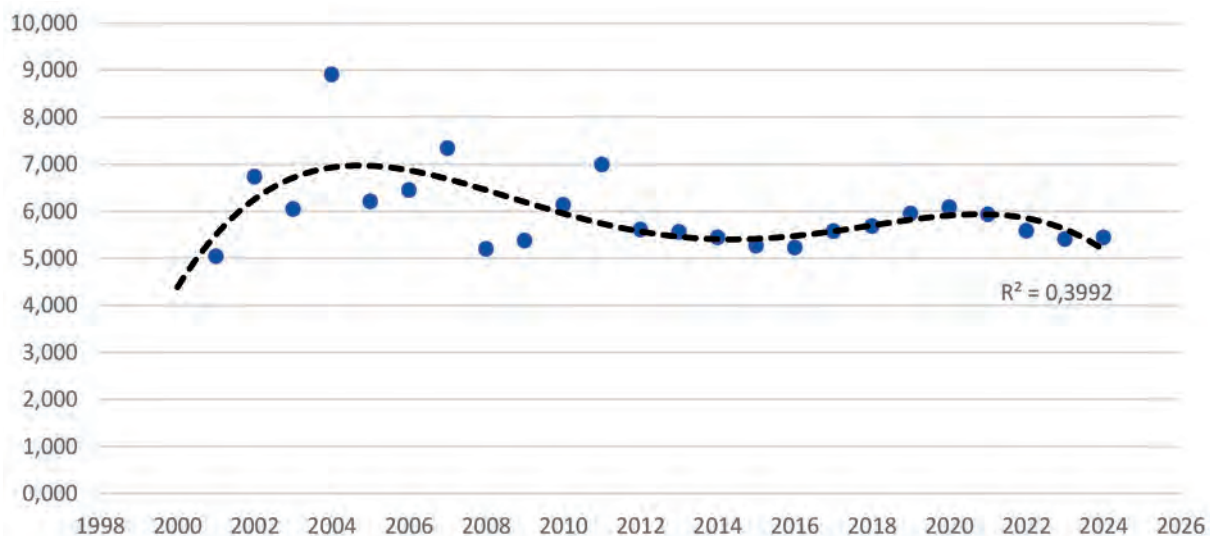


Рисунок 3. Динаміка вмісту завислих речовин у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр., мг/дм<sup>3</sup>

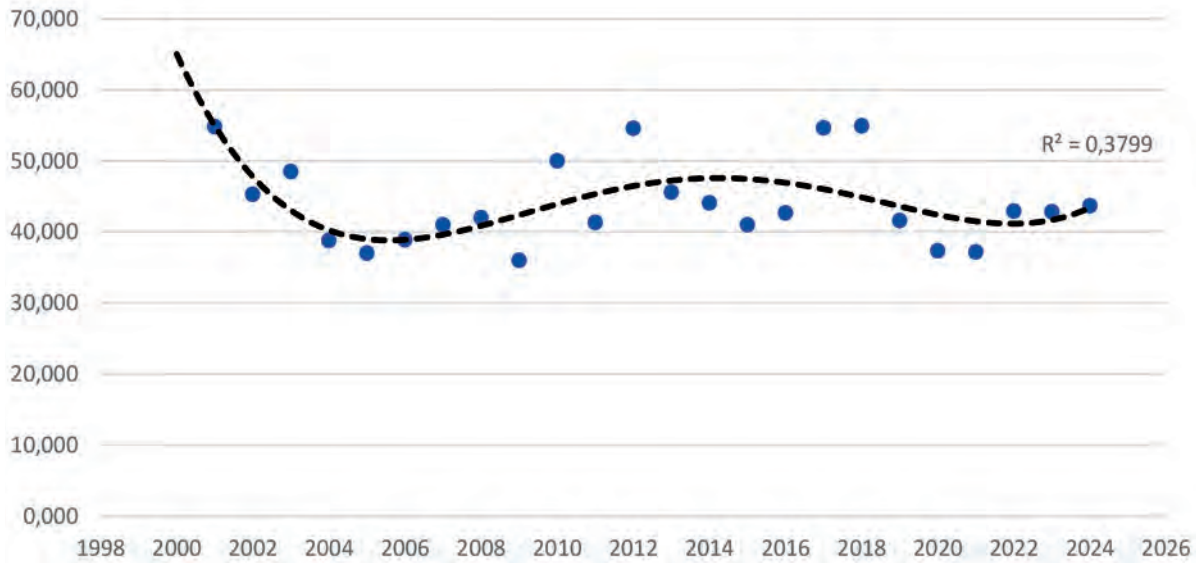


Рисунок 4. Динаміка вмісту сульфатів у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр., мг/дм<sup>3</sup>

Найбільші значення їх середнього вмісту фіксувались у 2012, 2018 та 2018 роках. Середній вміст сульфатів описується поліноміальним трендом 4-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,3799$  (рис. 4).

Середній вміст хлоридів у воді питного водозабору протягом 2000–2024 років варіював у межах від 9,4 до 81,5 мг/дм<sup>3</sup> і не перевищував встановлену норму 300 мг/дм<sup>3</sup>. Середній вміст

хлоридів описується поліноміальним трендом 5-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,1633$  (рис. 5).

Середній вміст фосфатів у воді протягом 2000–2024 років знаходився у межах від 0,028 до 0,105 мг/дм<sup>3</sup> і не перевищував встановлену норму 0,7 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 6).

Середній вміст азоту амонійного у воді питного водозабору протягом досліджуваного періоду

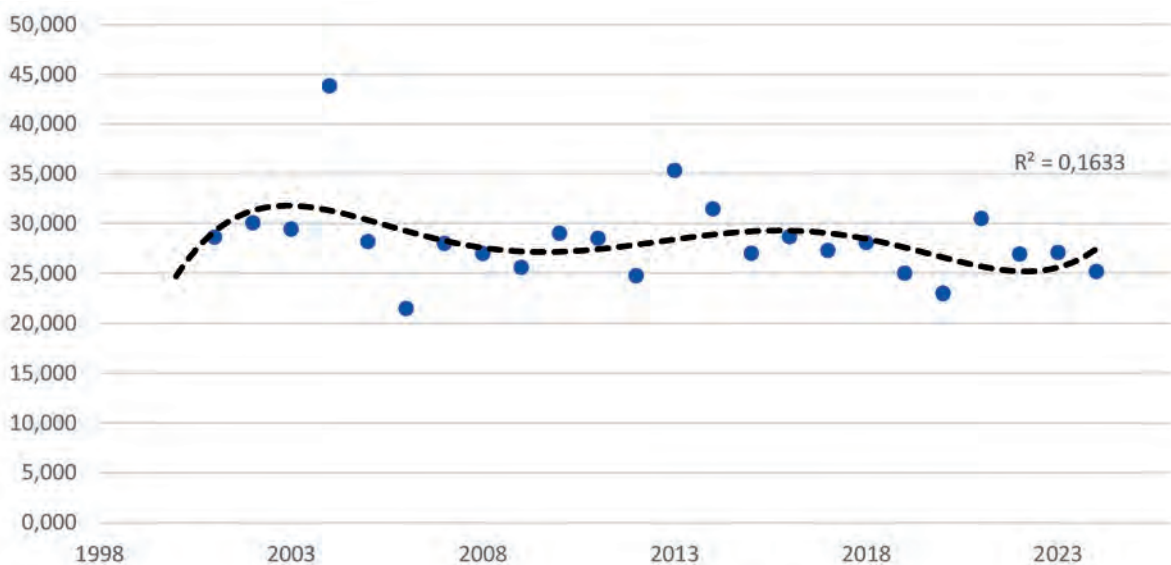


Рисунок 5. Динаміка вмісту хлоридів у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр., мг/дм<sup>3</sup>

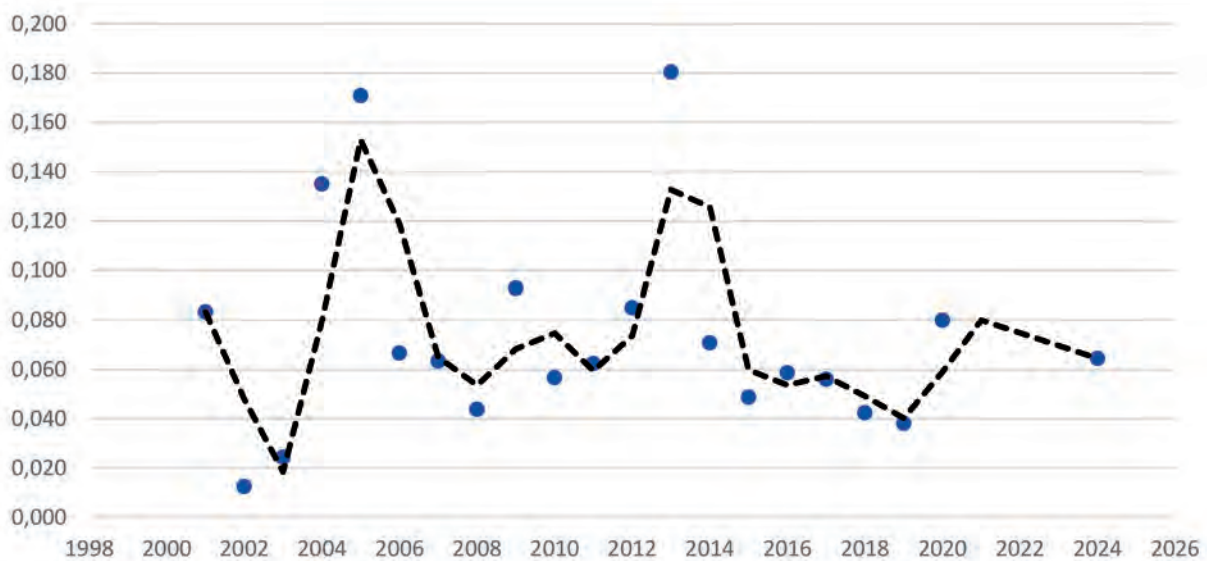


Рисунок 6. Динаміка вмісту фосфатів у питному водозаборі протягом 2000–2024 років, мг/дм<sup>3</sup>

перевищував нормативні значення у 2000 (1,11 рази), 2001 (1,07 рази), 2004 (1,14 рази), 2005 (1,4 рази) та 2006 (1,08 рази) роках.

Середній вміст азоту амонійного описується поліноміальним трендом 6-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,6065$  (рис. 7).

Середній вміст нітратів не перевищував встановленої норми і коливався у воді у межах 1,9–3,3 мг/дм<sup>3</sup>. Середній вміст нітратів описується

поліноміальним трендом 6-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,6577$  (рис. 8).

Вміст нітритів у воді за досліджуваний період знаходився у межах 0,001–0,20 мг/дм<sup>3</sup>. За вмістом нітритів відхилення від норми виявлено у 2,96% аналізованих значень (у 1,5 рази у січні 2015 р., та жовтні 2011 р., у 2,5 рази – у квітні 2005 р., у 1,1 та 1,7 рази – у червні 2003 та 2006 р., у 1,2 рази – у вересні 2013 роках.

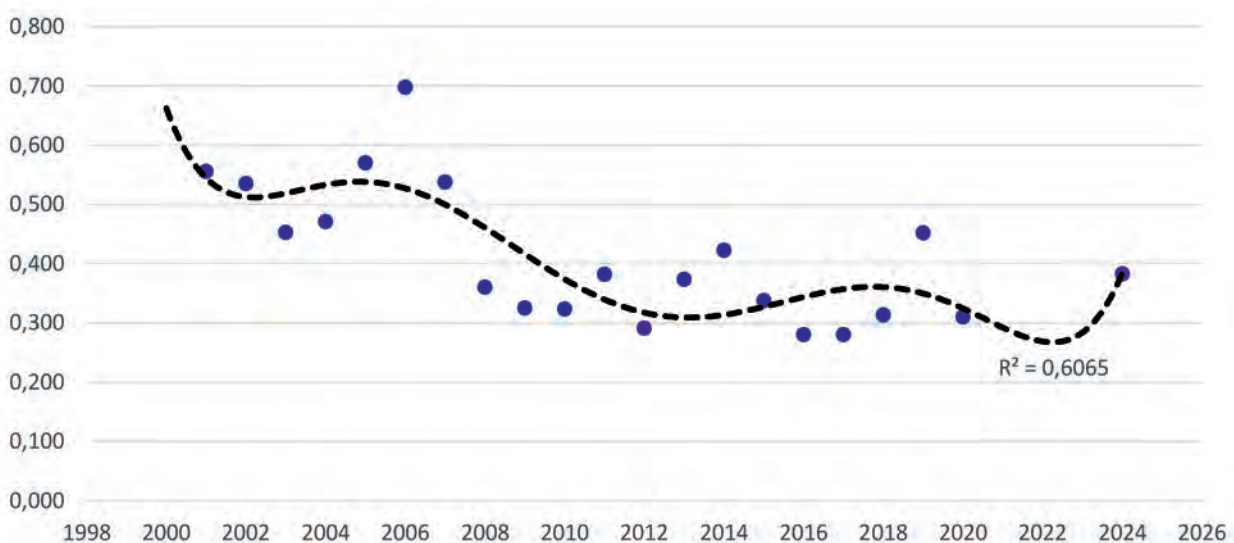


Рисунок 7. Динаміка вмісту азоту амонійного у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр., мг/дм<sup>3</sup>

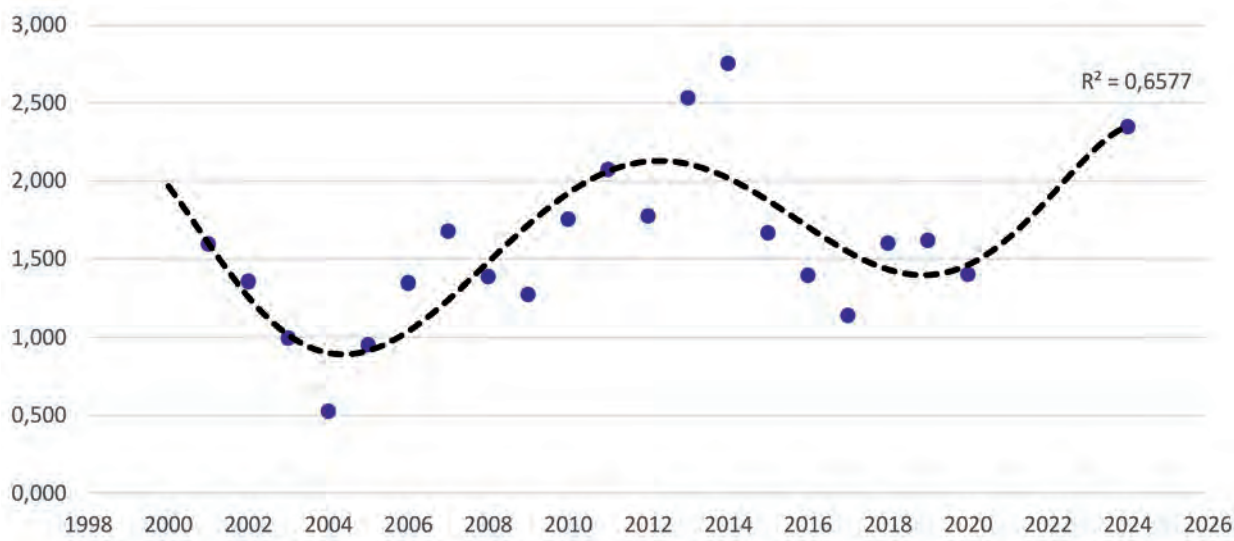


Рисунок 8. Динаміка вмісту нітратів у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр., мг/дм<sup>3</sup>

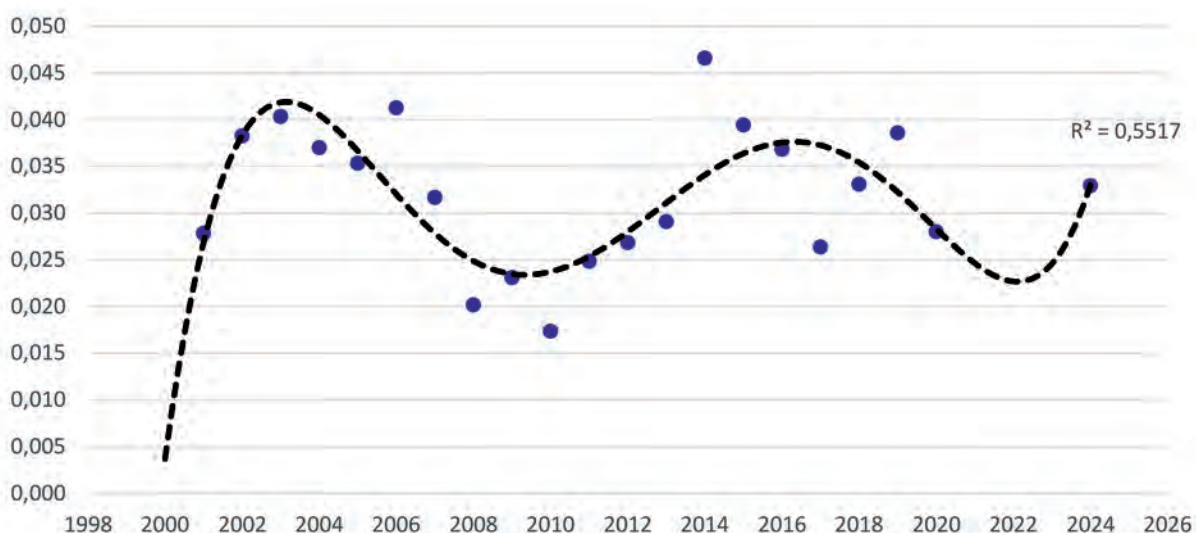


Рисунок 9. Динаміка вмісту нітритів у питному водозаборі протягом 2000–2024 рр., мг/дм<sup>3</sup>

Середній вміст нітритів описується поліноміальним трендом 5-го ступеня з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,5517$  (рис. 9).

Отже, отримані результати підтверджують необхідність системного гідрохімічного моніторингу р. Тетерів, зокрема в районі питного водозабору м. Житомир.

Регулярне відстеження змін хімічного складу води дозволить завчасно виявляти джерела забруднення та розробляти ефективні заходи щодо їх усунення.

## Висновки

На основі проведеного дослідження та отриманих результатів гідрохімічного стану р. Тетерів у межах питного водозабору м. Житомир за період 2000–2024 рр., було виявлено неоднорідну динаміку забруднення водного об'єкта. Аналіз результатів показав, що найбільш проблемними виявилися показники БСК<sub>5</sub>, де перевищення нормативу 3 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> спостерігалось практично протягом всього досліджуваного періоду, за винятком 2011, 2012, 2014 та 2015 років;

азот амонійний, який перевищував норматив у 2000–2001 та 2004–2006 рр., до 1,4 рази; та нітриту, для яких було зафіксовано перевищення нормативу у 2,96% випадків з максимальним перевищенням у 2,5 рази. Водночас, низка показників продемонструвала позитивну динаміку та відповідність нормативам: розчинений кисень стабільно знаходився в межах норми, завислі речовини мали лише одиничне перевищення у березні 2003 року, сульфати та хлориди були стабільно нижче нормативних значень, фосфати значно не перевищували гранично допустимих концентрацій, а нітрати залишалися в межах норми протягом всього періоду спостережень.

Аналіз трендів досліджуваних показників виявив найвищу достовірність апроксимації для нітратів ( $R^2 = 0,6577$ ) та азоту амонійного ( $R^2 = 0,6065$ ), середню достовірність для нітритів ( $R^2 = 0,5517$ ) та розчиненого кисню ( $R^2 = 0,5416$ ), а також низьку достовірність для хлоридів ( $R^2 = 0,1633$ ), що свідчить про хаотичність змін цього показника. Крім того, було виявлено сезонність коливань окремих показників та їх залежність від природних та антропогенних факторів, що потребує додаткового вивчення для розробки превентивних заходів.

## Висновки

Отримані результати дослідження можуть бути використані для розроблення системи раннього попередження про погіршення якості води, оптимізації режимів роботи очисних споруд, створення прогностичних моделей зміни якості води та обґрунтування необхідності модернізації системи водопідготовки.

Також отримані дані можуть стати основою для розроблення рекомендацій щодо зменшення антропогенного навантаження на водний об'єкт, вдосконалення системи моніторингу якості води та планування природоохоронних заходів з відповідним фінансуванням. На основі проведеного дослідження можливе створення геоінформаційної системи моніторингу якості води, розроблення муніципальних програм з покращення якості питної води та обґрунтування інвестиційних проєктів з модернізації системи водопостачання міста Житомир.

## Список використаних джерел

1. Аналіз стану та моніторинг поверхневих водних об'єктів Чернігівської області. / Г. Кірейцева та ін. Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. 2024. вип. 1. С. 84–91.
2. Герасимчук Л., Валерко Р., Калініченко І. Оцінка якості води системи централізованого водопостачання м. Житомир та наслідки від її споживання. Водні біоресурси та аквакультура. 2021. Вип. 2. С. 118–127. URL: <https://doi.org/10.32851/wba.2021.2.10>.
3. Huang Z., Hejazi M., Li X., Tang Q., Vernon C., Leng G., Liu Y., Döll P., Eisner S., Gerten D., Hanasaki N., Wada, Y.: Reconstruction of global gridded monthly sectoral water withdrawals for 1971–2010 and analysis of their spatiotemporal patterns. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. 22: 2117–2133. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2117-2018>.
4. Левковська Л., Мандзик В. Теоретичні засади формування системи сталого водозабезпечення в умовах екологічних обмежень. Економіка природокористування і сталий розвиток. 2020. № 7. С. 32–39.
5. Герасимчук Л., Валерко Р. Стан питних водозаборів Житомирської області як індикатора безпеки водокористування. Водні екосистеми у контексті євроінтеграції: реалії та перспективи : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., приуроченої до Всесвітнього дня водних ресурсів. Житомир, Україна, 21 берез. 2019. Житомир : ЖНАЕУ, С. 123–125.
6. Лотоцька О.В., Кондратюк В.А., Кучер С. В. Якість питної води як одна з детермінант громадського здоров'я в Західному регіоні України. Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України. 2019. № 1. С. 12-18. DOI: 10.11603/1681-2786.2019.1.10278.
7. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Члек О. М., Миколайчук О. В., Муляр А. П. Фінансове забезпечення сфери охорони навколишнього природного середовища в Житомирській області. Екологічні науки. 2023. №. 4 (49). С. 153-158. DOI: 10.32846/2306-9716/2023.есо.4-49.20.
8. Осадчий В. І. Ресурси та якість поверхневих вод України в умовах антропогенного навантаження та кліматичних змін. Матеріали наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 31 травня 2017 р. Вісник На-

ціональної академії наук України. 2017. № 8. С. 29–46.

9. Шумигай І.В., Манішевська Н.М., Постоєнко Д.М., Мороз В.В. Гідрохімічний режим та екологічний стан водного басейну р. Тетерів. Агро-екологічний журнал. 2020. № 4. С. 47-58. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2020.219445>.

10. Kotsiuba I., Skyba G., Skuratovskaya I., Lyko S. Ecological Monitoring of Small Water

Systems: Algorithm, Software Package, the Results of Application to the Uzh River Basin (Ukraine). Methods and objects of chemical analysis, Article. 14, 2019. № 4. P. 200–207. URL: [http://moca.net.ua/print/moca\\_2019\\_14\(4\)\\_200-207p.pdf](http://moca.net.ua/print/moca_2019_14(4)_200-207p.pdf).

11. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України / Державне агентство водних ресурсів України. URL: <http://monitoring.davr.gov.ua/Reporting/ViewReports/ViewReport?id=394>.

## УТИЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ ЯК АСПЕКТ ЕКОЛОГІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ

Демчук Л. І.<sup>1</sup>, Русецька Н. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Державний університет «Житомирська політехніка»  
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005  
*ke\_dlm@ztu.edu.ua*

<sup>2</sup>Житомирський агротехнічний коледж  
вул. Покровська, 96, м. Житомир, 10031  
*rusya050@ukr.net*

У статті розглянуто та систематизовано наукові підходи в необхідності вирішення проблеми стійкої утилізації електронних засобів, визначено поняття відходів електричного та електронного обладнання як екологічної категорії, наведено етапи життєвого циклу для типового електронного виробу з урахуванням його повторного використання.

Метою статті є обґрунтування утилізації електронних засобів.

Для досягнення поставленої мети було виконано наступні завдання:

- аналіз сучасних технологій утилізації відходів електронного та електричного обладнання;
- аналіз впливу на довкілля при утилізації відходів електронного та електричного обладнання;
- аналіз досвіду утилізації відходів електронного та електричного обладнання;
- розроблення рекомендацій щодо утилізації відходів електронного та електричного обладнання.

Досліджено міжнародний досвід розв'язання даної проблеми, зокрема проєкт «Best of 2 World». Визначено економічні переваги впровадження масштабного перероблення електронних відходів в Україні.

Було доведено, що стійка рециркуляція таких відходів може набути значення вторинного сировинного резерву для різних галузей промисловості, будівництва та енергетики.

Проаналізовано, що утилізація електронних засобів є важливою екологічною проблемою, оскільки вони містять шкідливі речовини, які можуть забруднювати навколишнє середовище та завдати шкоди здоров'ю людини.

Для розв'язання даної проблеми роз'яснено, що для утилізації електронних засобів необхідно вживати комплекс заходів, включаючи: створення ефективних систем збирання та перероблення електронних відходів, що дозволить відокремлювати цінні матеріали та безпечно утилізувати шкідливі речовини; прийняття законів, які регулюють утилізацію електронних засобів та встановлюють відповідальність за їх безпечне поводження; підвищення обізнаності населення про небезпеку електронних відходів та важливості їх правильної утилізації; розроблення та виробництво електронних пристроїв, які містять менше шкідливих речовин та є більш придатними для перероблення.

Проінформовано про те, що у багатьох країнах існують успішні програми з утилізації електронних відходів. Наприклад, в Європейському Союзі діє Директива про відходи електричного та електронного обладнання (WEEE), яка встановлює вимоги до збирання та перероблення електронних відходів. Міжнародний досвід свідчить, що динаміка обсягів відходів електронних виробів є синхронною динаміці проданих в окремій країні таких товарів, але з відставанням, що приблизно відповідає тривалості життєвого ци-

клу відповідного устаткування. Зокрема, Україна посідає 36 місце по споживанню електронної та комп'ютерної техніки, тому проблема утилізації електронних відходів набуває своєї актуальності як аспект екологічної проблеми.

Утилізація електронних засобів є серйозною екологічною проблемою, яка потребує комплексного розв'язання. Тільки спільними зусиллями зі сторони держави, бізнесу та громадян можна досягти успіху у вирішенні цього питання.

**Ключові слова:** перероблення відходів, важкі метали, циркулярна економіка, токсичні матеріали, ресурсозбереження, зелене виробництво.

### **Recycling of electronic equipment as an aspect of the environmental problem.** *Demchuk L., Rusetska N.*

The article reviews and systematises scientific approaches to the need to address the problem of sustainable recycling of electronic means, defines the concept of waste electrical and electronic equipment as an environmental category, and presents the stages of the life cycle for a typical electronic product with due regard for its reuse.

The purpose of the article is to substantiate the recycling of electronic means.

To achieve this goal, the following tasks were set and completed:

- analysis of modern technologies for recycling waste electronic and electrical equipment;
- to analyse the environmental impact of recycling waste electronic and electrical equipment;
- analysis of the experience of recycling waste electronic and electrical equipment;
- development of recommendations for the disposal of waste electronic and electrical equipment for Ukraine.

International experience in solving this problem, in particular the Best of 2 World project aimed at developing an alternative solution to this problem, is studied. The economic benefits of introducing large-scale e-waste recycling in Ukraine are determined.

It is proved that sustainable recycling of such waste can become a secondary raw material reserve for a number of industries, construction and energy sectors.

It is analysed that the disposal of electronic means is an important environmental problem, since they contain harmful substances that can pollute the environment and harm human health.

To solve the problem, it is explained that the recycling of electronic equipment requires a set of measures, including: the creation of effective e-waste collection and recycling systems that will allow the separation of valuable materials and safe disposal of harmful substances; the adoption of laws regulating the recycling of electronic equipment and establishing responsibility for their safe management; raising public awareness of the dangers of e-waste and the importance of its proper disposal; development and production of electronic waste treatment facilities; and the development of new technologies.

The participants were informed that international experience shows that many countries already have successful e-waste recycling programmes. For example, the European Union has the Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive, which sets out requirements for the collection and recycling of electronic waste. International experience shows that the dynamics of waste electronic products is synchronous with the dynamics of such goods sold in a particular country, but with a lag that roughly corresponds to the life cycle of the relevant equipment. In particular, Ukraine ranks 36th in terms of consumption of electronic and computer equipment, so the problem of e-waste disposal is gaining relevance as an aspect of the environmental problem.

Recycling of electronic equipment is a serious environmental problem that requires a comprehensive solution. Only through joint efforts of the government, business and citizens can we succeed in this area and ensure safe e-waste management for the environment and human health.

**Keywords:** waste recycling, heavy metals, circular economy, toxic materials, resource conservation, green manufacturing.

### **Постановка проблеми**

З розвитком технологій кількість електронних пристроїв, які використовуються, постійно зростає. Це призводить до збільшення кількості електронних відходів, які потребують утилізації. Електронні відходи містять небезпечні речовини, такі як свинець, ртуть, кадмій та інші важкі метали. Якщо ці речовини потрапляють у ґрунт або воду, вони можуть забруднити навколишнє середовище та завдати шкоди здоров'ю людини.

Крім того, неправильна утилізація електронних відходів може призвести до втрати цінних ресурсів (золото, срібло та інші метали).

Заводи з виготовлення електронної техніки порівняно з підприємствами інших галузей промисловості дають відносно невелику кількість викидів у навколишнє середовище. Більшість промислових виробництв розташовані у містах, тому природоохоронні заходи на таких підприємствах життєво необхідні.

Велика кількість процесів, операцій та матеріалів, що використовуються під час виготовлення електронних засобів, є джерелами величезної кількості речовин, що мають несприятливий вплив на людину та довкілля. Під час виготовлення елементної бази, електронних виробів, оброблення, вирощування напівпровідникових кристалів, виготовлення інтегральних схем у процесі гальванічного виробництва утилізація вихідних матеріалів часто відбувається з низьким коефіцієнтом використання. І як наслідок, величезна кількість відходів потрапляє у атмосферу, гідросферу, забруднює воду та ґрунт. Відтак, поряд із виснаженням природних запасів дефіцитних матеріалів відбувається забруднення навколишнього середовища, що веде до згубних наслідків для окремих екосистем та біосфери.

Негативний вплив на навколишнє середовище відбувається протягом усього життєвого циклу виробу, від придбання сировини, виготовлення виробу до його утилізації після закінчення терміну застосування.

Пошуки шляхів виходу із ситуації що склалася, призводять до висновку, що без знання екологічних принципів організації живої матерії, без усвідомлення професійної відповідальності кожного громадянина та учасника виробничого процесу неможливе подальше існування людства. Ці заходи повинні мати законодавчі обмежувальні документи, що регламентують процеси виробництва нової та утилізації відпрацьованої електронної продукції.

### Актуальність дослідження

Виробництво електроніки протягом останніх 30 років стало певною мірою залежати від південно-китайського та американського ланцюга

постачання. Пандемія COVID-19 разом з глобальними економічними потрясіннями значно прискорила поляризацію Південного Китаю та Америки на два глобальні ланцюги постачання, особливо в галузі електроніки. Ці реалії надають Україні унікальну можливість стати ключовою євразійською технологічною, інфраструктурною, виробничою та агробізнесовою базою та перетворитися на важливу складову нової глобальної системи ланцюгів постачання.

Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР), що є найбільшим іноземним інвестором в Україні. Є думка, що європейські компанії повинні почати вирішувати проблеми з такими ланцюгами постачання, створивши «глобальний ланцюг вартості» із залученням до цього процесу нашу країну, яка має низку переваг:

- вдале географічне розташування;
- 19 Угод про вільну торгівлю із 46 країнами, включно з Поглибленою та всеохоплюючою зоною вільної торгівлі між Україною та Європейським Союзом (ЄС);
- наявність кваліфікованої робочої сили;
- конкурентні витрати на виробництво.

Усе це в поєднанні дає можливість Україні стати важливою виробничою платформою для виробництва електроніки, що орієнтується на внутрішній та експортний ринки.

Проте, ЄС споживає 43% експорту з України, отже наша країна вже є невід'ємною частиною європейського ланцюга постачання. Завдяки проведенню глибоких економічних реформ та імплементації Угоди про асоціацію Україна-ЄС, ще до пандемії інвестори вже розглядали Україну як стабільний та передбачуваний ринок, що розвивається. Низка вітчизняних та зарубіжних виробників електроніки вже мають в Україні свої виробничі потужності. Кількість таких компаній буде поступово зростати і Україна має перспективи на те, щоб стати ключовою ланкою в ланцюгах постачання у світі після завершення військових дій.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні дослідження доводять, що проблеми утилізації електронних відходів як складової екологічного менеджменту досить широко розглядаються у працях таких вчених, як Хомяков В.,

Абалкін Л., Єремєєв І., Ящук Л., Краснянський М., Виговська Є., та інших. Вчені зробили значний внесок у розробку науково-практичних засад вирішення проблем поводження з електронними відходами. Але, попри великої кількості наукових розробок, проблеми формування економічного механізму управління електронними відходами залишаються невирішеними.

**Новизна дослідження** полягає в тому, що з'явилося кілька інноваційних підходів до утилізації електронних відходів, які допомагають зменшити їх негативний вплив на екологію.

**Методологічне значення** потребує в утилізації електронних засобів комплексного підходу, що поєднує знання з інженерії, хімії, екології, економіки та соціології. Це сприяє розвитку міждисциплінарних методів дослідження та вирішення складних проблем. Проблема утилізації електронних засобів є складною системою, що включає виробництво, споживання, збирання, перероблення та утилізацію. Такі дослідження потребують системного аналізу для виявлення ключових факторів та розроблення ефективних стратегій. Для управління проблемою утилізації електронних засобів необхідно розробляти моделі, які враховують різні сценарії та дозволяють прогнозувати наслідки різних рішень.

Загальнонаукове значення полягає в правильній утилізації електронних засобів. Неправильна утилізація може призвести до забруднення навколишнього середовища важкими металами та іншими шкідливими речовинами. Електронні засоби також містять цінні матеріали такі як, золото, срібло, мідь тощо. Їх повторне використання сприяє не тільки збереженню природних ресурсів але й зменшенню потреби у видобутку. Утилізація електронних засобів є важливим елементом циркулярної економіки, яка передбачає повторне використання матеріалів та зменшення кількості відходів. Забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами з електронних відходів може негативно впливати на здоров'я людини, спричиняючи важкі захворювання.

Загалом, утилізація електронних засобів є важливою проблемою, яка має значний вплив на екологічну безпеку, ресурсозбереження та здоров'я людини. Її дослідження та вирішення потребує комплексного підходу та міждисциплінарної співпраці.

## Виклад основного матеріалу

Екологічні проблеми електронної промисловості стають дедалі гострішими, що пов'язано, з одного боку, із розширенням таких виробництва, а з іншого – із складним виготовленням електронних виробів з використанням токсичних речовин.

Протягом тривалого часу більшість електронних гаджетів виготовляли у США. І тільки порівняно недавно, такі виробництва перемістилися за кордон у розвиваючі країни, при цьому використовуючи дешеву робочу силу та слабке місцеве законодавство. Власники фірмового знаку передали контракти на виготовлення електроніки своїм новим партнерам. І як наслідок, такі електронні вироби, які ми купуємо, збираються в примітивних майстернях (наприклад, у Китаї) де робітників змушують працювати понаднормово для високої інтенсивності виробництва.

Найбільшим контрактом на виробництво електроніки володіє компанія Hon Hai Precision Industry, Ltd Тайваню (Foxconn) [3, 4]. Ця компанія володіє 13 підприємствами тільки в Китаї, а у всьому світі зайнято майже 1 мільйон робітників. Давно відомо, в яких нелюдських умовах фірма Apple виробляє iPhones і iPads. Застосовувана потужна система призвела до того, що в 2020 р. майже 20 робітників намагалися покінчити життя самогубством.

Досліджено, що на таких заводах робітники працюють від 36 до 160 годин на місяць. Хоча на законодавчому рівні встановлена межа 36 годин; на дев'яти з десяти заводів мінімальна щомісячна заробітна платня становить 138 доларів, що не забезпечує прожитковий мінімум робітників, при цьому умови праці на потоковій лінії дуже важкі, а робочий день триває понад 10 годин на добу. Робітники працюють без перерв на всіх заводах було виявлено випадки дискримінації під час прийому на роботу.

Швидкий розвиток електроніки, призводить до швидкого застарівання техніки та подальшої утилізації. Потрібно зазначити, що цьому сприяє й агресивна рекламна кампанія фірм-виробників. Життєвий цикл телевізорів, телефонів, приладів глобальної навігації, офісного обладнання тощо стає дедалі коротшим, а собівартість виробленої продукції – вищою.

Необхідно враховувати, що у відходи надходить, як правило, величезна кількість надзвичайно дефіцитних матеріалів (сталі, пластику, кольорових і дорогоцінних металів, скла, деревини тощо), які потрібно повторно використати у виробництві. Багато цінних компонентів електронних виробів (золото, срібло, рідкісні метали), що містяться в друкованих платах, акумуляторах, кабелях, екранних моніторах, ртутних вимикачах тощо, також виключаються з виробничого обороту [5].

Електронні засоби та їхні компоненти, що руйнуються на звалищах (напівпровідникові чіпи, комп'ютерні клавіатури, монітори, пристрої зберігання інформації) стають джерелами 1000 різних матеріалів, що надходять у навколишнє середовище, включно з розчинами хлорованих речовин, бромованими препаратами-гасниками полум'я, полівінілхлоридами, важкими металами, пластиками, газами тощо.

Одна тільки електронно-променева трубка може містити від одного до трьох кілограмів свинцю. У великому телевізійному моніторі його виявиться ще більше.

Плоскі панельні телевізори та монітори містять менше свинцю, але більше ртуті. Приблизно 40% важких металів, включно зі свинцем, ртуттю і кадмієм, що виявляються в навколишньому середовищі, зобов'язані своєю присутністю електронних виробів, що викидаються і потрапляють на звалища [5].

Під час спалювання відходів на відкритих полігонах виникає особлива проблема утворення токсичних продуктів горіння. Це стосується, зокрема, пластмас, що використовуються при виготовленні електронних засобів. У цьому випадку характерне утворення надзвичайно небезпечних хімічних речовин – діоксинів.

Особливу небезпеку становлять PBDE, які інтенсивно виділяються в процесі горіння пластмас. Наразі ці речовини заборонені до використання, хоча у виробів, вироблених до 2014 р., вони містяться в досить високих кількостях.

Значні екологічні та економічні кроки обіцяє перероблення відходів електронної промисловості та повторне їх використання.

Вона має здійснюватися шляхом поділу відходів на окремі однорідні компоненти, виділення хімічними методами цінних для подальшого

використання компонентів, направлення їх для повторного використання.

Багато країн роблять серйозні кроки в цьому напрямку, насамперед у сфері законодавства та регламентування процесів утилізації та зберігання відходів виробництва. Європейський Союз був одним з перших та ще у 2003 році впровадив директиву про відходи електричного та електронного обладнання (WEEE Directive). Оновили документ у 2012 році. Найрозвинутіші системи переробки ВЕЕО в ЄС наразі мають Болгарія, Німеччина та Швеція.

Кращі європейські практики впровадженні в основу законопроектів «Про відходи електричного та електронного обладнання». Документ розроблений з урахуванням вимог Директив №2008/98/ЄС та №2012/19/ЄС. Він передбачає впровадження системи розширеної відповідальності виробника – тобто механізму, за якого виробники відповідатимуть за весь життєвий цикл власної продукції аж до її утилізації. Дана директива вимагає від усіх європейських виробників обладнання та комплектуючих брати на себе відповідальність за вироблений продукт після закінчення терміну його служби, включно зі стадіями збирання, перероблення та утилізації. У Великій Британії ввели заборону на викид відпрацьованої радіоелектроніки (старих телефонів, телевізорів, комп'ютерів тощо) на сміттєві звалища. Для таких товарів з'являються окремі місця утилізації відповідно до програми, розробленої у співпраці з представниками електронної промисловості. Такі заходи дають змогу щорічно відсіювати до 4500 тонн електронного сміття, а у сфері його перероблення створюються нові робочі місця.

Потрібно зазначити, що процес перероблення телевізорів, комп'ютерів, моніторів, принтерів, сканерів, телефонів, факсів і відеозаписувальних пристроїв може принести значну вигоду хоча б завдяки повторному використанню видобутих із них кольорових металів [6].

З отриманих під час перероблення продуктів електроніки вже зараз виробляють хорошої якості коробки, вивіски, деталі свічників, таблички та інші вироби за порівняно низькою ціною.

У США і в Європі існують спеціальні ринки, де продаються демонтовані і відновлені компоненти плат. Вони надходять на ринок із виробництв, де використовують робототехнічні систе-

ми, що забезпечують можливість ідентифікації та демонтажу тільки тих компонентів, яких бракує на складі. Однак доводиться рахуватися з тим, що швидке оновлення елементної бази та відносно низька вартість нових компонентів призведуть до серйозного обмеження повторного використання демонтованих компонентів невизначеної давності.

У Німеччині фірма FUBA перевела на комерційну основу виділення від 92 до 95% металів з відходів порожніх друкованих плат завдяки використанню механічних і гідрометалургійних методів розділення. Вони включають подрібнення, гранулювання, магнітне розділення, класифікацію та електростатичне розділення. Сукупність композицій, одержувана від цієї обробки, знайшла своє застосування у виготовленні виробів, що мають у своєму складі велику кількість скловолокна, а також як наповнювачі у виробництві будівельних матеріалів. Особливо успішним виявилось застосування склополімерних композицій для виробництва ємностей і піддонів, стійких до хімічного впливу, за технологією, розробленою фірмою FUBA. Металеві складові відходи друкованих плат (переважно мідь) розчиняються в сульфатній та нітратній кислотах з подальшим відновленням міді.

У китайському місті Гуйюй (його ще називають Гуйюй-Парк електроніки) розташовано найбільше у світі підприємств із переробки електронних відходів. Понад 17 тисяч підприємств з утилізації електронних відходів забезпечує роботою десятки тисяч людей. При цьому щорічно утилізували 1,5 млн т електронних відходів, що приносило \$ 75 млн доходу.

Необхідно, однак, зауважити, що процес перероблення електронних відходів у Китаї перебуває на надзвичайно низькому рівні. Жодних заходів з охорони праці не вживається. Широко використовується ненормована ручна праця жінок і дітей. Найчастіше перероблення електронних відходів відбувається в примітивних умовах, де відсутні засоби захисту і норми екологічного контролю. Спроби отримання золота або платини з електронних відходів пов'язані з ризиком втрати здоров'я, що не може бути компенсовано жодними матеріальними вигодами. Зокрема, у результаті дослідження крові у китайських дітей, які проживають у провінції Гуан-

донг, вміст свинцю становить у середньому 15,3 мкг/децилітр.

Основна причина цього сміттевого «цунамі» – шалений споживчий попит на різні гаджети та іншу електроніку. Термін їх використання досить короткий, оскільки технології швидко змінюються, а ремонт виробниками у більшості випадків не передбачається. Очікується, що у 2030 році за рік утвориться аж 82 млн тонн, тобто, на 33% більше, ніж у 2022 році. За даними звіту Світового економічного форуму за 2022 рік, глобальна вартість електронного сміття становить 70 млрд доларів, що перевищує ВВП багатьох країн. А на сміттєзвалища викинули корисних елементів на суму орієнтовно 62 млрд дол.

Ефективне управління електронними відходами має ключове значення для зменшення екологічного впливу та економічних втрат від цього швидкозростаючого глобального виклику. В Міністерстві захисту довкілля та природних ресурсів України було розроблено проєкт Закону «Про електричне та електронне обладнання та відходи електричного та електронного обладнання», який наразі знаходиться на фінальній стадії громадського обговорення. Його впровадження дозволить Україні, навести лад у сфері електронних відходів.

Екологічний підхід у галузі виробництва продуктів електроніки може принести і приносить вже в даний час істотну економічну вигоду тим країнам, які усвідомили необхідність термінових заходів у сфері захисту здоров'я свого населення і навколишнього середовища. Уряди цих країн стимулюють наукові дослідження щодо захисту здоров'я свого населення і довкілля.

Усі наявні та потенційні підходи до обробки твердих відходів передбачають механічні та механіко-гідрометалургійні методи. Внаслідок самої природи відходів гідрометалургійній обробці передують механічне подрібнення і сепарація. Основною перевагою систем механічного очищення є сухий режим роботи без використання будь-яких хімічних речовин, у той час як застосування мокрих процесів з використанням хімікатів створює небезпеку для навколишнього середовища. Необхідно зазначити, що гідрометалургійний підхід є хорошою альтернативою переплавленню відходів, а також дає можливість отримати більш високий вихід відновлених металів.

Під час виробництва електронних продуктів та їхніх компонентів (напівпровідникових чипів, комп'ютерних клавіатур, моніторів, пристроїв зберігання інформації) використовується понад 1000 різних матеріалів, включно з розчинами хлорованих речовин, полівінілхлориди, важкі метали, пластики, гази тощо, багато з яких здатні завдавати важкої шкоди навколишньому середовищу і здоров'ю робітників.

Значна шкода робітникам виникає на стадії складання та монтажу електронного виробу, де використовуються розплавлені припої, лаки, фарби та пластмаси, в яких містяться токсичні добавки.

Робітники, зайняті у виробництві електроніки, можуть піддаватися впливу понад тисячі різних хімічних речовин. Багато з цих речовин збільшують ризик захворювання на онкологічні захворювання та спричиняють пошкодження репродуктивної функції людини. Основні ризики пов'язані з вмістом в електронних виробах важких металів, такими як: свинець, ртуть, кадмій. Небезпека свинцю для людини визначається його значною токсичністю і здатністю накопичуватися в організмі. За ступенем впливу на живі організми свинець віднесено до класу високонебезпечних речовин поряд із миш'яком, кадмієм, ртуттю, селеном, цинком, фтором і бензпіреном [2].

Свинець спричиняє пошкодження мозку в дітей, у зв'язку з чим вживання багатьох продуктів для них обмежене. Ртуть токсична в дуже малих дозах, вона впливає на мозок і пошкоджує нирки. Вона може потрапити в організм уже з грудним молоком. Усього 1/70 чайної ложки ртуті може спричинити отруєння близько 100 000 квадратних метрів озерної поверхні, роблячи рибу непридатною до вживання в їжу. Кадмій акумулюється в тілі людини і може спричинити пошкодження нирок. Найбільшої шкоди завдає пентабромдифеніловий ефір. Ці сполуки здатні поширюватися на великі відстані та чинити хронічний вплив на живі організми.

Згадані хімічні речовини та матеріали здатні чинити шкідливий вплив на здоров'я робітників і суспільства загалом. Нині найпоширенішим є процес отримання високочистих твердих матеріалів шляхом хімічного осадження з газової фази (ХОГФ) (англ. *Chemical vapor deposition, CVD*) - плазмохімічний процес, який також використо-

вується в індустрії напівпровідників для створення тонких плівок, селективного видалення і модифікації матеріалів. Як правило, під час процесу CVD підкладка поміщається в пари однієї або декількох речовин, які, вступаючи в реакцію і/або розкладаючись, виробляють на поверхні підкладки необхідну речовину. Часто утворюється також газоподібний продукт реакції, що виноситься з камери з потоком газу. На відміну від інших технологій газозафазні процеси вигідно відрізняються підвищеною якістю одержуваних продуктів, можливістю точного управління параметрами процесу. Газозафазні процеси знайшли широке застосування хімічно стійких матеріалів:

- $Al_2O_3$ , благородні, тугоплавкі метали та їхні сплави;
- глибоке і наскрізне припаювання матеріалів IV групи (C, Ge, Si, SiC, SiGe);
- сполук із високим аспектним відношенням за субмікронних топологічних розмірів формованих елементів складу (GaAs, AlN, InP) і (CdTe, ZnO);
- конформне осадження ненапружених діелектричних покриттів ( $SiN_x$ ,  $SiO_x$ ,  $SiON_x$ );
- атомно-шарове осадження, широкий спектр дифузійних процесів;
- газозафазна епітаксія з металоорганічних сполук.

Зниженню ризику впливу на здоров'я людей і стан навколишнього середовища могла б послужити заміна токсичних гідридів металів менш небезпечними матеріалами. Останніми роками активізувалися дослідження з використання МОС-елементів як альтернативи гідридам. Наприклад,  $As(CH_3)_3$ ,  $As(C_2H_5)_3$ ,  $C_4H_9PH_2$ ,  $C_3H_7PH_2$  замість  $AsH_3$ ,  $PH_3$ . Найкращі результати дає використання частково заміщених МОС  $AsH_2(C_2H_5)$ ,  $AsH_2(C_4H_9)$ .

Екологічну ситуацію порушують викиди в секторі виробництва напівпровідникових приладів та електронної апаратури, що утворюються під час процесів дифузії, очищення, які містять парникові гази, токсичні, хімічно і корозійно-активні речовини (пари кислот, легувальні домішки, чистячі гази та леткі органічні сполуки).

Рекомендовано виключити за можливості застосування токсичних компонентів під час виготовлення електронних засобів. Зусилля проєктувальників спрямовані на виготовлення елементів

конструкції з чистих пластмас без добавок барвників, мінімізацію складу застосовуваних пластмас та інших матеріалів. Виконання цих вимог призведе до спрощення подальшого перероблення та утилізації знятих з експлуатації електронних приладів.

Обмеження використання небезпечних компонентів може розширити можливості, підвищити економічну ефективність виробництва електронного обладнання та скоротити негативний вплив на здоров'я робітників.

## Висновки

Поліпшення екологічної ситуації в електронній промисловості може бути здійснене при створенні так званої зеленої електроніки, в рамках якої токсичні матеріали під час виробництва засобів електроніки замінюються нетоксичними і такими, що легко розкладаються в навколишньому середовищі. Важливим є впровадження на підприємствах стандартів систем екологічного менеджменту. Водночас дослідження з альтернатив токсичних матеріалів та інвестиції для безпечної утилізації електронних відходів катастрофічно відстають від темпів появи нових електронних пристроїв. Необхідні нові стандарти з випробування використовуваних матеріалів, особливо в галузях, пов'язаних із медициною, аерокосмічними технологіями. Покращене тестування матеріалів і створення надійної бази даних щодо токсичності матеріалів може стимулювати виробників враховувати безпеку продукту на ранніх стадіях проектування після ухвалення експлуатаційних та економічних рішень.

## Список використаних джерел

1. Закон України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року № 2320-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
2. Recycling – From E-waste To Resources: United Nations Environment Programme and United Nations University. 2009. URL: [http://www.unep.org/pdf/pressreleases/Ewaste\\_publication\\_screen\\_finalversionsml.pdf](http://www.unep.org/pdf/pressreleases/Ewaste_publication_screen_finalversionsml.pdf)
3. Балде К.П., Форті В., Грей В. та ін. Глобальний моніторинг електронних відходів, 2020 рік. та ін. URL: : [https://www.itu.int/en/ITUDE/Environment/Documents/Toolbox/GEM\\_2020\\_RU.pdf?csf=1&e=t2aSZu](https://www.itu.int/en/ITUDE/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_RU.pdf?csf=1&e=t2aSZu)
4. Liu X., Tanaka V., Matsui Y. Electrical and electronic waste management in China: progress and the barriers to overcome. J. Waste Management Research, 2006, 24, 92–101
5. Oladele A. Ogunseitan, Julie M. Schoenung, Jean-Daniel M. Saphores, Andrew A. Shapiro The Electronics Revolution: From E-Wonderland to E-Wasteland. J. Science, 2009, 326, 670-671.
6. Про затвердження Порядку ведення державного обліку та паспортизації відходів : Постанова Кабінету Міністрів України від 01.11.1999 р. № 2034 : станом на 9 верес. 2020 р.
7. Утворення та утилізація відходів за матеріалами у 2016 році: Держстат України. 1998-2016. URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/ns/ns\\_u/utvut\\_u2016.html](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/ns/ns_u/utvut_u2016.html).
8. Крайнов І.П., Крилюк В.М., Шаго Є.П. Управління екологічною безпекою в сфері поводження з відходами електронного та електричного обладнання: Екологічна безпека. № 1. 2012. С. 13–17.
9. Наявність у домогосподарствах окремих товарів тривалого користування: Держстат України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/>
10. Іщенко В.А. Поводження з небезпечними компонентами побутових відходів у Вінницькій області: Матеріали XLV Науково-технічної конференції ВНТУ, м. Вінниця, 23-24 березня 2016р. URL: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ebmd/all-2016/paper/view/1055>
11. Філатов Л.Г., Сидоренко С.В., Кононенко О.С. Поводження з електронними відходами в Україні: аналіз проблеми та шляхи вирішення. URL: [http://archive.nbu.gov.ua/portal/Natural/vcp/NRvST/2012\\_34/index.htm](http://archive.nbu.gov.ua/portal/Natural/vcp/NRvST/2012_34/index.htm)
12. Сафранов Т.А., Шаніна Т.П., Приходько В.Ю. Класифікація твердих побутових відходів як передумова формування системи поводження з ними в регіонах України : монографія. Дніпро : Вид. Біла К.О, 2018. 100 с.
13. Сучасний стан політики поводження з електронними відходами в Україні та Європейському Союзі: кроки до зближення. Під заг. ред. О.М. Цигульової. – К.: ВЕГО «МАМА-86», 2013.-172 с.

14. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядження від 8 листопада 2017 р. № 820-р // КМУ. Київ: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
15. Бондаренко І.М., Електронні системи: Навч. посібник / І.М. Бондаренко, О. В. Глухов, О. О. Кравчук // Харків: ХНУРЕ. 2019. – 219 с.
16. Бондаренко І.М., Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Бородин, В. П. Карнаушенко // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 268 с.
17. Важкі метали як фактор ризику для здоров'я людини та довкілля при поводженні з відходами електричного та електронного обладнання. URL: <http://protox.medved.kiev.ua/index.php/ua/issues/2015/>
18. Виговська Г.П. Вирішення проблеми електронних відходів: європейські підходи до української проблеми. URL: [https://dspace.univd.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/443/Vyrishennia%20problemy%20elektronnykh%20vidkhodiv\\_yevropeiski%20pidkhody%20do%20ukrainskoi%20problemy\\_Shumilo\\_Vyhovska\\_Tsyhulova\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.univd.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/443/Vyrishennia%20problemy%20elektronnykh%20vidkhodiv_yevropeiski%20pidkhody%20do%20ukrainskoi%20problemy_Shumilo_Vyhovska_Tsyhulova_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
19. Данилова Н. Чому давно пора зайнятися переробкою електронних відходів. Голова Асоціації управління відходами, для порталу Green Deal. URL: <https://interfax.com.ua/news/greendeal/778301.html>
20. Екологія, природокористування та охорона навколишнього середовища: прикладні аспекти: матер. VI Всеукр. наук.-практ. заоч. конф., м. Київ, 16 травня 2023 р. / за заг. ред. Х.С. Мітюшкіної. Київ: МДУ, 2023. 108 с.
21. Пендюр Т.В. Екологічне виховання та шлях вирішення проблем утилізації побутових відходів. Теорія і практика сучасної науки та освіти. 2020. Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції 22-23 жовтня 2020 р., Львівський форум. С.47-51.
22. Скорик О.О. Формування економічного механізму управління електронними відходами в Україні. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5433>
23. Тесленко І. Електронне сміття в Україні: викинути не можна переробити. URL: <https://www.unian.ua/consumers/818664-elektronne-smittya-vukrajini-vikinuti-ne-mojna-pererobiti.html>
24. Фалько В.В., Жук В.М. Світовий досвід щодо організації збору та утилізації електронних відходів та його впровадження в Україні. Збірник тез доповідей V Всеукраїнської міжвузівською науково-технічної конференції СДУ: Суми, 2018. С. 77-81.
25. Як в Україні планують впроваджувати норми європейського законодавства щодо відходів електричного та електронного обладнання. URL: <https://kpmg.com/ua/uk/blogs/home/posts/2020/05/polluterpaysprinciple.htm>

УДК 631.417

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-03>

## ВПЛИВ БОЙОВИХ ДІЙ НА СТАН ГРУНТОВОГО ПОКРИВУ

Можарівська І. А., Кравчук-Ободзінська Т. В.,  
Устименко В. І., Ковальова С. П.

Державний університет «Житомирська політехніка»  
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005

*ke\_mia@ztu.edu.ua*

*ke\_ktv@ztu.edu.ua*

Наслідки військових дій для ґрунтового середовища часто недооцінюються. Проте погіршення якісних характеристик ґрунту має тривалий характер, що значно знижує його продуктивність. Водночас ґрунти здатні відновлювати свої функціональні властивості та підвищувати продуктивність, що залежить від типу ґрунту, характеру військово-техногенного впливу та ландшафтних умов регіону.

Відновлення та навіть посилення педогенезу часто зменшує вплив воєнно-техногенного навантаження. Гіпотеза гетерогенного збурення, що виникає внаслідок воєнно-техногенного впливу, стверджує, що біорізноманіття досягає максимальних значень у місцях, де спостерігаються різні типи та інтенсивності порушень, які відрізняються за тривалістю та масштабом впливу на ландшафт.

Військові дії викликають різноманітні механічні, фізичні та хімічні впливи на ґрунтовий покрив. У сукупності ці негативні процеси призводять до деградації ґрунтової екосистеми, зниження її родючості, погіршення фізикогеохімічних властивостей, зменшення біорізноманіття мікроорганізмів і втрати здатності до самовідновлення. Це створює серйозні екологічні виклики для подальшого відновлення постраждалих територій і потребує розробки спеціальних заходів з реабілітації ґрунтів [1].

Для різних типів військових об'єктів комплекси порушень можуть варіюватися в залежності від виду та типів бойових дій, змін рельєфу поверхні, стану ґрунтів (воронки від вибухів), пошкоджень захисних споруд (окопів, блінда-

жів), забруднення верхніх шарів ґрунтового покриву внаслідок бойової діяльності, а також захаращення поверхні (залишками бойової техніки).

Особливу увагу варто приділити процесам трансформації фізико-хімічних властивостей ґрунтів під впливом важких металів та інших токсичних речовин, що потрапляють у ґрунт внаслідок детонації боєприпасів та руйнування військової техніки. Ці забруднювачі можуть зберігатися в ґрунті протягом десятиліть, змінюючи його кислотність, порушуючи мікробіологічні процеси та погіршуючи умови для розвитку рослинності.

Крім того, міграція цих речовин по ґрунтовому профілю може призводити до забруднення підземних вод, що створює додаткові екологічні ризики для прилеглих територій та потребує комплексного підходу до відновлення постраждалих екосистем.

Знищення рослинності, порушення ґрунтового покриву, нестача природного зволоження та опустелювання є поширеними наслідками військово-техногенного впливу. Внаслідок цього спостерігається значне зменшення біологічних популяцій та видів, а також втрата біорізноманіття, що ускладнюється змінами в структурі та функціях ландшафтів. Види впливів і їх наслідки для ґрунтів будуть розглянуті в наступних підрозділах.

**Ключові слова:** ґрунт, військові дії, навколишнє середовище, екосистема, методи дослідження.

**Influence of military operations on the soil cover state.** *Mozharivska I. A., Kravchuk-Obodzinska T. V., Ustymenko V. I., Kovaleva S. P.*

The effects of military operations on the soil are often underestimated. However, the deterioration of soil quality characteristics is long-lasting, which significantly reduces its productivity. At the same time, soils can restore their functional properties and increase productivity, depending on the type of soil, the nature of military and technological impact, and the landscape conditions of the region.

Restoration and even enhancement of pedogenesis often reduces the impact of military-technogenic load. The hypothesis of heterogeneous disturbance resulting from military-technological impact states that biodiversity reaches its maximum values in places where different types and intensities of disturbance are observed, which differ in duration and scale of impact on the landscape.

Military operations cause various mechanical, physical and chemical impacts on the soil cover. Taken together, these negative processes lead to degradation of the soil ecosystem, reduction of its fertility, deterioration of physical and geochemical properties, reduction of microbial biodiversity and loss of self-healing ability. This creates serious environmental challenges for the further restoration of the affected areas and requires the development of special soil rehabilitation measures [1].

For different types of military facilities, the complexes of disturbances may vary depending on the type and types of hostilities, changes in the landscape, soil condition (craters from explosions), damage to protective structures (trenches, dugouts), contamination of the upper layers of soil cover as a result of military activities, and surface clutter (remnants of military equipment). Special attention should be paid to the processes of transformation of physical and chemical properties of soils under the influence of heavy metals and other toxic substances that enter the soil due to the detonation of ammunition and destruction of military equipment. These pollutants can persist in the soil for decades, changing its acidity, disrupting microbiological processes, and deteriorating conditions for vegetation development. Moreover, the migration of these substances through the soil profile can lead to groundwater contamination, creating additional environmental risks for adjacent territories

and requiring a comprehensive approach to the restoration of affected ecosystems. Destruction of vegetation, disturbance of soil cover, lack of natural moisture and desertification are common consequences of military-technological impact.

As a result, there has been a significant decline in biological populations and species, as well as a loss of biodiversity, which is compounded by changes in the structure and function of landscapes. The types of impacts and their consequences for soils will be discussed in the following subsections.

**Keywords:** soil, military operations, environment, ecosystem, medical research.

### Опис проблеми

Оцінка воєнно-техногенного впливу на ґрунти поствоєнних ландшафтів проводиться з урахуванням рівнів інтенсивності бойових дій та типів бойових забруднень.

Однією з основних задач екологогеохімічної оцінки ґрунтів на територіях бойових дій є визначення складу і структури факторів воєнно-техногенного навантаження, а також вивчення причинно-наслідкових зв'язків між ними.

В Україні з лютого 2022 року відбуваються повномасштабні бойові дії з порушеннями ґрунтового покриву. Ці порушення охоплюють дві групи:

- паєрвинні – механічні деформації ґрунтового покриву та теплове забруднення;
- вторинні – ті, що спричинені наслідками невиконання стратегічних заходів поствоєнного відновлення – ерозійні процеси, пірогенна деградація тощо.

### Актуальність дослідження

Протягом окупації території зони відчуження Чорнобильської АЕС з 24 лютого 2022 року по 1 квітня 2022 року було завдано шкоди ґрунтовому покриву на площі 14 074 гектари через пожежі, викликані окупантами.

Після звільнення зони відчуження внаслідок дії вибухонебезпечних предметів було зафіксовано пожежі на площі 18 132 гектари.

Зміна кислотно-лужних умов у ґрунтах тери-

торій, які зазнали впливу пожеж, у бік нейтральної реакції рН є цілком очікуваним явищем. Це пояснюється проникненням водорозчинних зольних сполук у ґрунтовий профіль та насиченням поглинаючого комплексу лужноземельними елементами, що призводить до зміщення реакції середовища [2].

Додатковим негативним наслідком є пожежі, незалежно від їхнього джерела, які призводять до забруднення ґрунтів внаслідок горіння токсичних сполук, таких як поліароматичні вуглеводні.

Механічний вплив під час воєнно-техногенного навантаження проявляється у деформації ґрунтового покриву внаслідок переміщення колісної та гусеничної військової техніки, руху військ, зведення поверхневих і підземних споруд, бомбування, розмінування територій та створення оборонної інфраструктури.

Механічний вплив супроводжується хімічним забрудненням ґрунтів, що в результаті призводить до безстрокового виведення земель з експлуатації та заборони їх використання. Рух військ передбачає маневри важкої гусеничної та колісної техніки.

Основним впливом руху на ґрунт є ущільнення, яке призводить до пошкодження гумусового горизонту. Це має прямі негативні наслідки, такі як порушення водного балансу ґрунту, а також сприяє розвитку вітрової та водної ерозії.

При зниженні ступеня щільності спостерігається підвищення розрідження водонасичених дисперсних ґрунтів, що викликає їх перехід у текучий стан через руйнування структурних зв'язків під впливом динамічного навантаження.

Цей процес відбувається в кілька етапів:

- 1) Руйнування структури ґрунту;
- 2) власне розрідження незв'язного (піщані відміни) ґрунту;
- 3) ущільнення ґрунту.

Унаслідок ущільнення ґрунтів погіршується здатність рослин адаптуватися до кліматичних змін, посушливих умов та нестачі вологи.

Водночас, ґрунт, що ущільнився внаслідок механічного впливу, стає більш стійким до подальших воєнно-техногенних впливів у ситуації постійного дефіциту продуктивної вологи [3].

Деформації ґрунтового покриву, такі як пере-

мішування шарів ґрунту, виникають внаслідок створення приповерхневих та підземних фортифікаційних споруд, таких як бліндажі, окопи, траншеї, тунелі та сховища паливно-мастильних матеріалів і бойових матеріалів.

Це сприяє посиленню ряду небезпечних геоморфологічних процесів, таких як зсуви, заболочування та осідання ґрунту. Тому при зведенні фортифікаційних споруд необхідно враховувати глибину залягання ґрунтових вод і умови зволоження ґрунту.

**Метою роботи** є формулювання стратегії, ключових заходів та рекомендацій для повоєнного відновлення ґрунтів України, засноване на оцінці їх еколого-геохімічного стану в зонах активних бойових дій, з урахуванням регіональних ландшафтно-геохімічних умов та видів природокористування.

Однією з складових дослідження є аналіз міжнародного досвіду країн, які зазнали військових конфліктів на своїй території. Основна увага приділяється практикам та національним політикам відновлення територій, що постраждали від забруднення або фізичних ушкоджень. Крім того, розглядається досвід України у виведенні забруднених земель з зони Відчуження та їх відновлення після Другої світової війни.

## Викладення основного матеріалу

На жаль, військова агресія росії принесла нові виклики як для населення, так і для природних ресурсів України. Окрім зруйнованих міст і великої кількості загиблих, постійні обстріли завдають серйозної шкоди навколишньому середовищу: вибухи, пожежі, бомбардування, а також руйнування промислових об'єктів і систем життєзабезпечення призводять до забруднення повітря і води, знищення рослинності та унікальних екосистем.

Внаслідок російської агресії в навколишнє середовище потрапили небезпечні та шкідливі речовини, знищено родючі ґрунти, суттєво змінено ландшафти на великих територіях, а також знищено рослинність і тваринний світ, включаючи види, занесені до Червоної книги України.

Безпосередній вплив бойових дій на ландшафти та ґрунти виявляється у зміні поверх-

невих ділянок, фізичному (уламки, осколки) та хімічному забрудненні територій, а також у зміні фізико-хімічних властивостей і знищенні біологічної складової. Внаслідок вибухів і бойових дій формуються воронки, які руйнують структуру ґрунту та порушують його стабільність і властивості.

Це, в свою чергу, призводить до деградації ґрунту, викликаючи локальне ущільнення та підвищуючи схильність верхнього шару ґрунту до вітрової або водної ерозії.

Родючі ґрунти є одним із найбільших природних багатств України та світу, адже наша країна володіє третьою частиною світових чорноземів.

Внаслідок військових дій найбільше страждають верхні, найплodючіші шари ґрунту. За оцінками Української природоохоронної групи, з початку повномасштабного військового вторгнення росії близько 34% території України потрапили в зони, які зазнали безпосередньої військової агресії.

У цих районах вже спостерігається або існує ризик системного порушення поверхневого шару ґрунтів, а також забруднення (мінами, нафтопродуктами, нерозірваними боєприпасами тощо) [4].

Військові дії ще більше ускладнюють цю проблему і можуть прискорити процеси деградації.

Згідно з даними Державної екологічної інспекції, протягом перших чотирьох місяців повномасштабного наступу Росія завдала шкоди землі та ґрунтам на суму 80,5 млрд грн.

Насамперед, у післявоєнний період необхідно провести аналіз стану ґрунту.

Для оцінки стану ґрунтів в Україні після війни можна застосовувати **різноманітні методи та підходи**. Серед них:

- **відбір зразків ґрунту:** зразки ґрунту відбираються з різних територій, які були піддані впливу військових дій. Це може бути проведено шляхом відбору проб на різній глибині та в різних точках, які охоплюють пошкодженні території. Важливо виконувати відбір зразків ґрунту з дотриманням методики відбору зразків ґрунту, щоб забезпечити точність і надійність результатів аналізу;

- **хімічний аналіз ґрунту:** хімічний аналіз в свою чергу дозволяє визначити рівень забруднення ґрунтів шкідливими речовинами, вклю-

чаючи важкі метали, хімічні речовини та інші забруднюючі речовини.

#### **Основні складники хімічного аналізу ґрунту:**

- **Визначення кислотності ґрунту.** Оскільки рівень рН впливає на доступність поживних речовин для рослин та активність ґрунтових мікроорганізмів;

- **визначення азоту, фосфору, калію, кальцію та магнію.** Це дозволяє оцінити родючість ґрунту;

- **визначення вмісту важких металів, таких як свинець, кадмій, мідь, цинк, які можуть бути у ґрунті внаслідок військових дій.** Це важливо для оцінки потенційних небезпек для здоров'я людей та рослинного покриву;

- **визначення гумусу у ґрунті.** Органічні речовини впливають на структуру ґрунту, утримання вологи та доступність поживних речовин;

- **визначення наявності хімічних сполук, таких як пестициди, гербіциди, паливо, які можуть потрапити в ґрунт під час військових дій.** Це допомагає оцінити рівень забруднення та потенційних наслідків для довкілля та здоров'я [5].

Фізичний аналіз оцінює фізичні властивості ґрунту, такі як: текстура, структура, густина та вміст вологи.

*Біологічний аналіз* визначає наявність та розмаїття мікроорганізмів, бактерій, грибів та фауни в ґрунті. Це допомагає оцінити вплив на біологічну активність ґрунту та його відновлення.

*Мікробіологічний аналіз* дозволяє визначити кількість мікроорганізмів у ґрунті, таких як бактерії, гриби та віруси. Це допомагає оцінити біологічну активність та здатність ґрунту до розкладу органічних речовин.

*Фітопатологічний аналіз* дозволяє виявити наявність збудників хвороб та шкідників рослин у ґрунті. Це важливо для оцінки впливу на рослинний покрив та визначення потенційних загроз для сільськогосподарських культур.

Отримані дані дозволяють оцінити вплив військових дій на ґрунт та розробити стратегії його відновлення та рекультивациі.

*Геологічні та геохімічні дослідження* допомагають визначити склад та властивості ґрунтових горизонтів, геологічну структуру та можливі наявність гідрогеологічних проблем.

## Висновки

Для різних типів військових об'єктів комплекси порушень можуть різнитись від виду і типів бойових дій, їх поєднання. Порушення ґрунтового покриву внаслідок бойових дій за часом прояву поділяються на дві групи: первинні (виникають безпосередньо під час бойових дій; це – прямі механічні деформації ґрунтового покриву; теплове забруднення; захаращення поверхні ґрунту) та вторинні (ті, що проявляються у поствоєнний час – підтоплення, засолення, ерозійні процеси, пірогенна деградація, дегуміфікація тощо; їх виникнення – відсутність або невиконання стратегічних заходів поствоєнного відновлення).

Воєнно-техногенне навантаження виражається у механічному, фізичному та хімічному впливах на ґрунти, що зумовлює особливі, притаманні певним діям наслідки. Механічний вплив виражається у механічній деформації ґрунтового покриву, що призводить до руйнування структури ґрунтового покриву, ущільнення, заболочування тощо; засмічення продуктами бойової діяльності. Хімічний вплив виражається у зміні природних фізико-хімічних параметрів ґрунтового покриву (рівень рН, ЄКО, вмісту гумусу) зростання концентрації токсичних хімічних речовин.

У результаті можуть утворюватися локальні воєнно-техногенні геохімічні аномалії з різним спектром вибухових та інших токсичних речовин, що унеможлиблює на невизначений термін використання земель. Фізичний вплив виражається у зміні фізичних властивостей ґрунтового покриву внаслідок застосування систем зброї та військової техніки.

Зазвичай спостерігається комплексне поєднання різних чинників, що призводить до підсилення кожного із них і виникнення кумулятивного ефекту. Про це свідчать також результати моделювання поширення забруднювачів. Для оцінювання рівня пошкодження ґрунтів слід також застосовувати комплексний підхід спряженого урахування характеру пошкодження ґрунту та змін його фізико-хімічних властивостей.

**Негативні наслідки для ґрунтів** механічних, фізичних та хімічних впливів такі: унеможливлення обробітку земель, забруднених хімічними

речовинами, засмічених уламками і відходами; зниження або втрата родючості ґрунту; втрата здатності ґрунтів до самоочищення; втрата буферності ґрунтів щодо забруднювачів; втрата здатності до накопичення вологи; активація водної і вітрової ерозії, підтоплення і заболочування, опустелювання; втрата біорізноманіття [6]. Вплив воєнної діяльності є настільки нищівним, що його наслідки провокують ряд процесів, які призводять до повної деградації ґрунтових ресурсів. Така загроза потребує розроблення програмних заходів з рекультивації та/або консервації земель порушених внаслідок воєнних дій.

Аналіз досвіду політики відновлення земель країнами, які постраждали в результаті військової діяльності Відновлення поствоєнних територій, а також безпечна утилізація речовин воєнно-техногенного походження є пріоритетною складовою майбутнього їхнього розвитку.

Відповідно до Протоколу V «Конвенції про конкретні види звичайної зброї» існує юридичне зобов'язання щодо очищення, видалення або знищення вибухонебезпечних пережитків війни. Проте існує прогалина щодо нормативно встановлених вимог про відновлення земель, немає чіткого правового зобов'язання щодо ліквідації забруднення навколишнього середовища.

## Висновки

Отримані дані використовуються для оцінки стану ґрунтів, визначення рівня забруднення та розробки ефективних заходів рекультивації та відновлення.

Ці методи можуть використовуватися окремо або в комбінації, залежно від конкретних цілей дослідження і доступних ресурсів. Важливо проводити систематичні та повторні аналізи для відстеження змін стану ґрунтів та ефективності вжитих рекультиваційних заходів.

## Список використаних джерел

1. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель,

С. Чумаченко – Київ: ГО – Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с.

2. Види загальновійськового бою - бібліотека buklib.net. Головна - Бібліотека BukLib.net. URL: <https://buklib.net/books/37530/>.

3. Все про забруднення земель в Україні внаслідок воєнних дій. Куркуль-онлайн-асистентфермера. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/1423-chi-mojna-vilikuvati-grunt-vid-viyni-vid-povidina-nayposhirenishi-zapitannya>

4. Забруднення земель внаслідок агресії росії проти України / А. Сплодитель, О. Голубцов, С. Чумаченко, Л. Сорокіна. Київ: ГО – Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 154 с.

5. Ковальова С. П., Можарівська І. А. Кон-

центрація важких металів у ґрунтах при вирощуванні енергетичних культур на території радіоактивного забруднення. Науковий журнал Житомирського національного агроекологічного університету. 2020. № 3 (88). С. 121–126

6. Піціль А. О., Марков Ф. Ф., Можарівська І. А. Агрохімічна характеристика сільськогосподарських земель Житомирської області за вмістом сірки. Сучасні проблеми лісового господарства та екології: шляхи вирішення (Факультету лісового господарства та екології – 20 років) Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (7-8 жовтня 2021 року, м. Житомир). Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 233 – 234.

---

---

УДК 628.4:620.9

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-04>

## НАУКОВИЙ ПІДХІД У СТВОРЕННІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОДУКТУ

Філін В. В.

Маркіна Л. М.

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

*flini.vladimir@gmail.com**markserg@ukr.net*

У статті досліджується необхідність та актуальність розроблення та впровадження програмного забезпечення (що відповідає європейським стандартам) для управління відходами в Україні.

Автори статті акцентують увагу на актуальності цієї теми в умовах зростаючих екологічних викликів, інтеграції України в європейське співтовариство та соціальної відповідальності, спрямованої на реалізацію принципів циркулярної економіки.

Програмне забезпечення, що пропонується авторами, повинно стати ефективним інструментом для місцевих органів влади, підприємств та громадських організацій, щоб підвищити прозорість роботи та підзвітність у сфері управління відходами.

Важливим аспектом статті є використання новітніх технологій, таких як IoT та Big Data, які відкривають нові можливості для оптимізації системи управління відходами. В роботі визначено, що розроблення програмного забезпечення вимагає комплексного підходу, що включає технічні, соціально-економічні та екологічні аспекти. Також детально розглядаються принципи циркулярної економіки, зокрема зменшення утворення відходів, перероблення, повторне використання, залучення всіх учасників у процеси збирання та управління відходами.

Стаття також містить огляд європейського законодавства у сфері поводження з відходами, наголошує на еволюцію існуючих нормативно-пра-

вових актів та їх вплив на формування стратегії сталого розвитку. Автори зазначають, що адаптація європейських норм до українських реалій є важливим кроком у реалізації національної стратегії управління відходами до 2030 року.

Запропоноване програмне забезпечення має потенціал для значного покращення управління відходами в Україні, що сприятиме імплементації норм Європейського союзу (ЄС), аналізу даних, залученню громади до вирішення екологічних проблем та зменшенню витрат на оброблення та утилізацію відходів. Результати дослідження можуть стати основою для подальшого вдосконалення системи управління відходами, що відповідає вимогам сталого розвитку.

**Ключові слова:** відходи, інфраструктура, рециклінг, програмне забезпечення, управління відходами, національна стратегія поводження з відходами, циркулярна економіка.

**Scientific approach in software development for waste management as a tool for innovative product.** *V. Filin, L. Markina.*

The article investigates the necessity and relevance of developing and implementing software that meets European standards for waste management in Ukraine. The authors emphasize the importance of this topic in the context of increasing environmental challenges, Ukraine's integration into the European community, and social responsibility aimed at realizing the principles of a circular economy.

The proposed software is intended to serve as an effective tool for local authorities, businesses, and non-governmental organizations, enhancing transparency and accountability in waste management. An important aspect of the article is the use of cutting-edge technologies such as IoT and Big Data, which open new opportunities for optimizing the waste management system. The authors highlight that the development of the software requires a comprehensive approach that includes technical, socio-economic, and environmental aspects. They detail the principles of the circular economy, particularly waste reduction, recycling, reuse, and the involvement of all stakeholders in the processes of waste collection and management.

The article also provides an overview of European legislation in the field of waste management, indicating the evolution of regulatory acts and their impact on the formation of sustainable development strategies.

The authors note that adapting European norms to the realities of Ukraine is an important step in implementing the national waste management strategy by 2030.

The proposed software has the potential to significantly improve waste management in Ukraine, contributing to the implementation of EU standards, data analysis, community engagement in addressing environmental issues, and reducing costs for waste processing and disposal. The research findings may serve as a foundation for further enhancing the waste management system in accordance with sustainable development requirements.

**Keywords:** waste, infrastructure, recycling, software, management, national waste management strategy, circular economy.

### Постановка проблеми та актуальність

Управління відходами є однією з найважливіших екологічних проблем сучасності. Збільшення обсягів відходів та їх негативний вплив на навколишнє середовище вимагають термінових і ефективних рішень. Інтеграція України в європейське співтовариство підкреслює необхідність впровадження інноваційних методів управління відходами, які відповідатимуть європейським стандартам.

Значні масштаби ресурсокористування та спеціалізація національної економіки разом із застарілою технологічною базою, визначали високі показники утворення та накопичення відходів. Відмінність ситуації, що склалася з відходами в Україні, порівняно з іншими країнами полягає у великих обсягах утворення відходів (близько 450 млн тонн відходів щороку у довоєнний період) та у відсутності розвиненої інфраструктури поводження з ними. При цьому наявність такої інфраструктури є неодмінною ознакою всіх економік розвинутих країн.

Однією з причин низького рівня повторного використання та рециклінгу відходів полягає у відсутності комунікації між «утворювачами» відходів та «переробниками». Відповідний виробничий професійний досвід дослідника, а також вивчення відповідних нормативно-правових актів, зокрема ЄС, сприяв створенню пропозиції та подальшому впровадженні програмного забезпечення у даній сфері, яке стане допоміжним прикладним інструментом (структурною складовою побудови інфраструктури поводження з відходами) для реалізації Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року та Директив Європейського Парламенту і Ради (ЄС).

### Інноваційність. Перспективи

Розроблення програмного забезпечення для управління відходами потребує комплексного наукового підходу, що охоплює технічні та соціально-економічні аспекти. Інтеграція міждисциплінарних підходів, що об'єднують технології, екологію дозволяє створити інструменти, які можуть адаптуватися до змінних умов та вимог. Це забезпечує ефективність і довгострокову сталість рішень. Зі свого боку, довгострокова сталість рішень тісно пов'язана з тематикою циркулярної економіки тобто концепцією яка спрямована на зменшення відходів та збереження навколишнього середовища шляхом переходу від традиційної лінійної моделі «взяти-використати-викинути» до замкнутої системи, де продукти, матеріали та ресурси постійно перебувають в обігу.

Основні аспекти циркулярної економіки з огляду поводження з відходами:

1. *Зменшення утворення кількості відходів.* Циркулярна економіка акцентує увагу на запобіганні утворенню відходів ще на етапі проєктування продуктів. Це включає використання меншої кількості матеріалів, які легко переробляються, створення продуктів, які можуть бути довготривалими з можливістю подальшого ремонту.

2. *Перероблення та повторне використання.* Замість того, щоб викидати продукти, циркулярна економіка заохочує їх перероблення та повторне використання. Це може бути ремонт, оновлення та вторинне перероблення відходів.

3. *Системи збирання відходів.* Впровадження ефективних систем збирання та сортування відходів є критично важливим для успішної реалізації циркулярної економіки. При цьому, відбувається розвиток інфраструктури для збирання вторинної сировини, інформування та заохочення населення до участі в цих процесах.

4. *Використання вторинної сировини.* Циркулярна економіка підтримує ідею, що відходи можуть стати новими ресурсами. Це означає, що матеріали які раніше вважалися відходами, можуть бути перероблені та використані в нових продуктах.

5. *Інновації та технології.* Використання нових технологій, таких як 3D-друк, цифрові платформи та програмне забезпечення для обміну та повторного використання, а також інтелектуальні системи управління відходами також сприяє ефективнішому впровадженню принципів циркулярної економіки.

6. *Економічні переваги.* Циркулярна економіка не лише допомагає зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, але також може створювати нові економічні можливості, зменшити витрати на сировину і енергію та відкривати нові ринки для вторинної сировини.

7. *Залучення всіх учасників процесу.* Успішна реалізація циркулярної економіки вимагає співпраці між урядами, бізнесом, науковими установами та споживачами.

Кожен з цих учасників виконує певну роль у забезпеченні ефективного управління ресурсами та відходами.

У такий спосіб, запровадження принципів циркулярної економіки є важливою складовою стосовно управління відходами, що дозволяє

зменшити їх обсяги, зберегти ресурси та знизити екологічний вплив.

Впровадження запропонованої авторами ідеї, відповідає принципам сталого розвитку з одного боку та принципам формування та впровадження моделі циркулярної економіки з іншого. Поширення цифрових технологій сприятиме поліпшенню обміну інформацією та співпраці, які мають значення для формування і розвитку механізмів циркулярної економіки, а також посиленню потенціалу виробництв із замкнутим циклом.

### **Відповідність запропонованої тематики дослідницької роботи до нормативно-правовим актам Європейського Союзу**

Авторами статті проведено короткий історичний огляд змін Європейського законодавства у сфері поводження з відходами:

Зміни у законодавстві ЄС у сфері поводження з відходами відображають еволюцію суспільного сприйняття проблеми відходів, екологічних викликів та економічних потреб. Це законодавство стало основою для формування стратегії сталого розвитку та переходу до циркулярної економіки.

1. Початковий етап—1970 роки.

1975 р. – Директива про відходи (75/442/ЄЕС): Перша директива, що визначила базові принципи управління відходами в ЄС. Вона заклала основи для розроблення більш специфічного законодавства, зокрема, визначила поняття відходів і зобов'язала держави-члени забезпечити їх оброблення у спосіб, що не завдає шкоди навколишньому середовищу.

2. Розширення законодавства. 1980–1990 роки.

1986 р. – Директива про небезпечні відходи (86/278/ЄЕС): Встановила вимоги до обробки небезпечних відходів, зокрема, їх транспортування, зберігання та утилізацію. Ця директива зосередилася на захисті здоров'я людей і навколишнього середовища.

1991 р. – Директива про упаковку і відходи упаковки (91/156/ЄЕС): Визначила принципи управління відходами упаковки, зокрема, зобов'язала держави-члени запроваджувати системи збору та переробки упаковки, заохочуючи зменшення відходів.

### 3. Покращення стандартів – 2000 роки.

2000 р. – Директива про відходи (2000/76/ЕС): Модифікація попередніх директив, що включала нові вимоги до утилізації відходів, зокрема, через спалювання. В Директиві було встановлено стандарти для мінімізації впливу на навколишнє середовище.

2008 р. – Європейська стратегія з управління відходами: Визначила ключові цілі та пріоритети для зменшення обсягів відходів, заохочення до переробки та запобігання утворенню відходів.

### 4. Циркулярна економіка–2010 роки.

2015 р. – Пакет з управління відходами: Склався з кількох директив, що встановлюють нові цілі з переробки та зменшення відходів. Наприклад, директива 2018 року про відходи упаковки передбачала досягнення 65% рівня переробки до 2025 року.

2018 р. – Директиви про одноразові пластикові вироби: Мета – зменшення відходів від пластикових виробів, таких як: пластикові пакети, трубочки та контейнери, шляхом запровадження заборон та обмежень.

### 5. Сучасні ініціативи – 2020 роки.

2020 р. – Європейський зелений курс: Стратегія, що передбачає досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року та акцентує увагу на сталому управлінні відходами як одному з ключових аспектів.

2021 р. – План дій з циркулярної економіки: Включає конкретні заходи, спрямовані на покращення систем збору, переробки та повторного використання відходів, а також заохочення інновацій у цій сфері.

Зміни в європейському законодавстві у сфері поводження з відходами відображають не лише еволюцію екологічної політики, але й перехід до нових моделей економічного розвитку, зокрема впровадженню регламенту таксономії.

Регламент таксономії був опублікований в Офіційному журналі Європейського Союзу та набув чинності 12 липня 2020 року. Він закладає основу для таксономії ЄС та встановлює 4 головні умови, яким повинна відповідати економічна діяльність, щоб кваліфікуватися як екологічно стійка:

Суттєвий внесок у екологічні цілі: Діяльність повинна суттєво сприяти принаймні одній з шести визначених екологічних цілей, таких як: пом'якшення наслідків зміни клімату, адаптація

до зміни клімату, раціональне використання та охорона водних і морських ресурсів, перехід до циркулярної економіки, запобігання та контроль забруднення, охорона та відновлення біорізноманіття та екосистем.

- Відсутність значної шкоди. Діяльність не повинна завдавати суттєвої шкоди жодній з інших екологічних цілей. Це означає, що вона не може мати негативний вплив на інші аспекти екології.

- Відповідність соціальним стандартам. Діяльність повинна відповідати мінімальним соціальним гарантіям зокрема, правам людини та трудовим правам, що також включає дотримання міжнародних стандартів.

- Дотримання технічних критеріїв. Діяльність повинна відповідати конкретним технічним критеріям, визначеним для кожної категорії діяльності, що забезпечує її екологічну стійкість.

Отже, таксономія є основою системи сталого фінансування ЄС і важливим інструментом прозорості ринку. Це допоможе спрямовувати інвестиції у такі види економічної діяльності, які найбільше потрібні для переходу, відповідно до цілей Європейської зеленої угоди.

Як зазначено на офіційному веб-ресурсі Європейської комісії, – щоб досягти кліматичних та енергетичних цілей ЄС на 2030 рік і досягти цілей Європейської зеленої угоди, життєво важливо спрямовувати інвестиції на проекти та заходи, що стосуються сталого розвитку. Для досягнення цього, потрібне спільне визначення терміну «стійкий». Ось чому план дій щодо фінансування сталого зростання передбачав створення загальної системи класифікації сталого економічної діяльності або таксономії ЄС.

Таксономія ЄС дозволяє фінансовим і нефінансовим компаніям мати спільне визначення економічної діяльності, яку можна вважати екологічно стійкою.

Згідно з Положенням про таксономію, було розроблено фактичний перелік екологічно стійких видів діяльності де визначені технічні критерії перевірки для кожної окремої екологічної цілі через делеговані та імплементаційні акти. До яких відносяться: – Регламент комісії ЄС № 2023/2486 «Технічні критерії відбору, пов'язані з переходом до циркулярної економіки» від 27 червня 2023 року. Цей регламент доповнює Регламент (ЄС) 2020/852 Європейського парламенту

та Ради і формує основи для визначення сталих інвестицій в контексті екологічної політики. Його впровадження має на меті стимулювати переходи до більш екологічної економіки в рамках досягнення амбітних цілей у сфері навколишнього середовища. Цей документ важливий для екологічної відповідальності бізнесу та реалізації стратегій сталого розвитку на рівні ЄС.

Пропонована авторами дослідницька діяльність відповідає п. 4.1 (d) та п. 5.6 Додатку II регламенту комісії ЄС № 2023/2486 «Технічні критерії відбору для визначення умов, за яких економічна діяльність вважається такою, що суттєво сприяє переходу до кругової економіки та для визначення, чи не завдає ця економічна діяльність суттєвої шкоди жодній з інших екологічних цілей».

А саме, п. 4.1. Надання ІТ/ОТ рішень на основі даних.

Опис діяльності. Діяльність полягає у виробництві, розробленні, установленні, впровадженні, обслуговуванні або наданні професійних послуг, включно і технічне консультування для проектування або моніторингу програмного забезпечення для проектування та інженерії, що підтримує екологічне проектування продуктів, обладнання та інфраструктури, включно і управління відходами та ефективність ресурсів;

п. 5.6. Торговельна платформа для обігу вживаних товарів з метою повторного використання.

## Опис діяльності

Розроблення та експлуатація торгових платформ та оголошень для обігу (продажу або обміну) вживаних продуктів, матеріалів або компонентів з метою повторного використання, де торгові платформи та оголошення виступають посередниками для з'єднання покупців, які шукають послугу або продукт, з продавцями або постачальниками цих продуктів чи послуг.

Економічна діяльність охоплює торгові платформи та оголошення, що підтримують продажі B2B, B2C та C2C. Діяльність включає послуги, такі як з'єднання покупців і продавців, а також послуги з оплати чи доставлення.

Економічна діяльність стосується продуктів та виробів, які виготовляються та класифіковані кодами NACE від значення C10 до C32 (вибірково).

## Огляд базових вхідних термінів та визначень:

**Програмне забезпечення** – це загальний термін для різних видів програм, що використовуються для роботи з комп'ютерами та пов'язаними з ними пристроями, зокрема, з планшетами та смартфонами. Програми надають можливість взаємодіяти людині з комп'ютером, забезпечуючи функціональність.

Програмне забезпечення поділяється на системне, прикладне та інструментальне/сервісне (рис. 1).

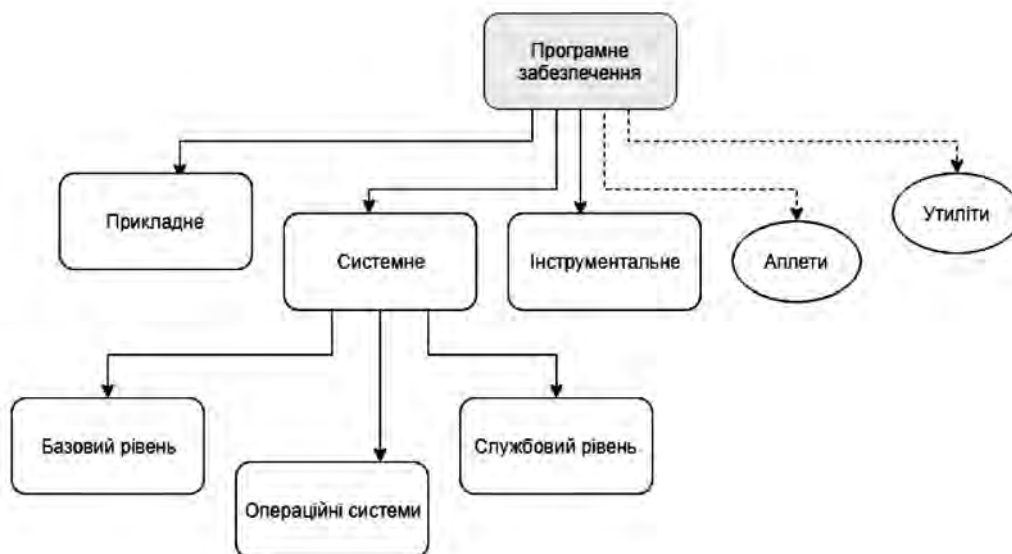


Рисунок 1. Класифікація програмного забезпечення



Рисунок 2. Основа запропонованого інструменту

До системного програмного забезпечення відносяться: драйвери та операційні системи: набір програм, які забезпечують взаємодію інших програм з базовими програмами та апаратними засобами.

Прикладне програмне – забезпечує виконання конкретних завдань на комп'ютері: захисту від вірусів наукових, прикладних та інших. Наприклад, текстові та графічні редактори, диспетчери файлів, веб-редактори, архіватори даних, веб-браузери.



Рисунок 3. Коротко про основу даного інструменту в призмі сталого розвитку [розроблення авторів]

Інструментальне / сервісне забезпечення призначене для використання в ході створення архітектури, розроблення, оновлення та інсталяції програм.

Автори дослідження розпочали роботу зі створення прикладного програмного забезпечення відповідно до класифікації що наведена вище.

Використання сучасних технологій, таких як Big Data та IoT, у процесі розроблення програмного забезпечення є новаторським підходом, що може суттєво поліпшити існуючі практики. Ці технології дозволяють здійснювати глибокий аналіз даних, автоматизувати процеси та підвищити ефективність прийняття рішень (рис. 2, 3).

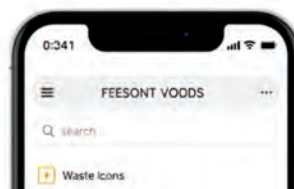
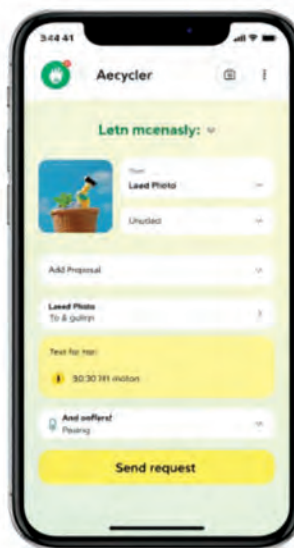
Тема охоплює кілька дисциплін, включає екологію, право, інформаційні технології та управлінські науки. Це робить її особливо важливою для розвитку науки і практики. Інтеграція цих підходів дозволяє розробити концептуальну модель програмного забезпечення, що враховує специфіку українського контексту, вимоги європейських норм та сталого розвитку.

## Тестування програмного забезпечення

Будь-який програмний продукт потребує тестування для виявлення дефектів та помилок, допущених на стадії інженерії програмного забезпечення. Тестування програмного забезпечення – це перевірка відповідності фактичним результатам. Процес передбачає запуск та виконання компонента програмного забезпечення або компонента системи для оцінки однієї або декількох властивостей. Тестування програмного забезпечення також допомагає виявити прогалини або відсутній функціонал всупереч реальним вимогам. Тестування даного програмного забезпечення передбачається в найближчій перспективі (до кінця 2025 року), оскільки потребує завершення робіт над створенням мінімального життєздатного продукту (англ. Minimum viable product – MVP).

Прототип інтерфейсу мобільного додатку над яким проводиться робота передбачає:

Комірку для фото відходу, який пропонується для подальшої передачі. Комірка передбачає основне фото та не більше ніж 4 додаткових фото (до 5).



Комірку для подальшого вибору коду відходу відповідно до Національного класифікатора відходів.

Комірку для внесення опису відходу (не більше 200 знаків).

Комірку для внесення відомостей щодо місця розташування/локації відходів.

Комірку для внесення відомостей щодо кількості відходів та періодичності вивезення.

Комірку для внесення контактних відомостей щодо утворювача відходів, – компанії що пропонує відходи.

Огляд вітчизняних аналогів. Існує українська платформа: <https://waste.ua/#menu>. На основі наданої інформації про сайт, можна виділити кілька сильних та слабких сторін цього програмного забезпечення.

### Сильні сторони

1. *Актуальність інформації.* Сайт містить оголошення про купівлю та продаж вторинної сировини, що свідчить про активну участь учасників у ринку вторинних матеріалів.

2. *Широкий асортимент матеріалів.* Пропонуються різноманітні види вторинної сировини (ПВД, ПНД, ПП тощо), що може залучити різних замовників і постачальників.

3. *Питання еко-інновацій.* наявність інформації про біочар (біовугілля) свідчить про зацікавленість у екологічних технологіях та нових підходах до поводження з відходами.

4. *Регіональність.* Є опція щодо міст (Харків, Кривий Пір) та регіонів, що робить сайт більш релевантним для місцевих учасників ринку.

### Слабкі сторони

1. *Обмежена інформація:* Інформація на сайті виглядає як прості оголошення без детального опису послуг чи продуктів, що може ускладнити процес прийняття рішень.

2. Відсутність інтерактивності: Немає згадок про функціонал для взаємодії користувачів, такий як онлайн-чат або форуми для обміну досвідом.

3. Недостатня реклама: Якщо сайт орієнтований на нові технології та рішення у сфері поводження з відходами, може бути корисно мати більше інформації про інновації та стратегії.

4. Візуальний дизайн: Відсутність інформації про візуальний аспект сайту, але якість представлення контенту може впливати на привабливість для користувачів.

Іноземний аналог представлений на ресурсі: <https://www.wastetrade.com/buy/>

На основі наданого вмісту документа можна виділити наступні сильні та слабкі сторони платформи WasteTrade:

#### **Сильні сторони:**

1. *Сприяння сталому розвитку.* WasteTrade підтримує ініціативи з перероблення пластику, що важливо в умовах підвищеної екологічної свідомості.

2. *Легка доступність.* Платформа пропонує спрощений процес купівлі переробленого пластику, однозначно вказує на різноманітність доступних матеріалів та їх застосування.

3. *Зменшення вуглецевого сліду.* Заохочення використання перероблених матеріалів допомагає зменшувати вплив на довкілля та сприяє створенню замкнутої економіки.

4. *Верифікація постачальників.* Платформа підключає користувачів лише до перевірених компаній, що підвищує довіру до процесу купівлі.

5. *Оптимізація логістики.* Пропонування баляваного пластику як рішення для зниження витрат на транспортування є важливим фактором у цій сфері.

#### **Слабкі сторони:**

1. *Обмежена інформація.* У тексті не наводиться інформація про географічні обмеження, мови підтримки чи види пластику, які можна придбати, що може бути важливим для потенційних користувачів.

2. *Конкуренція.* Інші платформи можуть також пропонувати аналогічні функції, тому важливо відзначити, чим WasteTrade відрізняється від конкурентів.

3. *Освітня підтримка.* Можливо, не вистачає додаткових ресурсів або навчальних матеріалів, які б допомогли користувачам краще зрозуміти процеси перероблення та методи відбору пластику.

4. *Залежність від перевірки.* Якщо питання з перевіркою постачальників не будуть вирішені належним чином, це може підірвати довіру до платформи.

Отож, WasteTrade має низку переваг, які підтримують її позицію у сфері перероблення пластику, проте є сфери, в яких вона могла б покращитися для забезпечення кращого досвіду для користувачів.

### **Програма та методи досліджень**

Метою дослідження є створення науково обґрунтованого підходу до розроблення та впровадження програмного забезпечення для управління відходами. Завдання включають аналіз законодавства, визначення викликів, розроблення концептуальної моделі, використання сучасних технологій, розроблення методології, оцінку ефективності та формулювання рекомендацій для практичного використання.

Дослідження пропонує інтеграцію міждисциплінарних підходів, розроблення нової концептуальної моделі програмного забезпечення та створення оригінальної методології впровадження. Адаптація європейських норм до українських реалій є новим аспектом у національній екологічній політиці.

### **Висновки**

Програмне забезпечення сприятиме ефективному управлінню відходами, спонукає імплементацію норм ЄС, аналіз даних та залучення громадськості. Це зменшить витрати на оброблення та утилізацію, підвищить екологічну безпеку та сприятиме сталому розвитку.

### **Список використаних джерел**

1. Директива Європейського Парламенту та Ради ЄС 2008/98/ЄС про відходи та скасування

певних директив [Електронний ресурс]. – Режим доступу по ресурсу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_029-08#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text)

2. EU taxonomy for sustainable activities – European Commission [Електронний ресурс]. – Режим доступу по ресурсу: [https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities\\_en](https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en)

3. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2486 of 27 June 2023 supplementing Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council by establishing the technical screening criteria for determining the conditions under which an economic activity qualifies as contributing substantially to the sustainable use and protection of water and marine resources, to the transition to a circular economy, to pollution prevention and control, or to the protection and restoration of

biodiversity and ecosystems and for determining whether that economic activity causes no significant harm to any of the other environmental objectives and amending Commission Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities [Електронний ресурс]. – Режим доступу по ресурсу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R2486>

4. Закон України «Про управління відходами» [Електронний ресурс]. – Режим доступу по ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>

5. Розпорядження КМУ «Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року». [Електронний ресурс]. – Режим доступу по ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗЕЛЕНИХ ДАХІВ У ПОГЛИНАННІ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК PM<sub>2.5</sub> ТА PM<sub>10</sub> В УМОВАХ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

Герасимчук Л.О., Рибак О. С.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005

*Gerasim4uk@ukr.net*

*ke\_ros@ztu.edu.ua*

У статті представлено результати дослідження ефективності поглинання твердих частинок PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> зеленими дахами в умовах міського середовища. Дослідження проводилось на території м. Житомир з використанням даних мережі громадського моніторингу якості повітря Eco City за 2020–2024 рр.

Встановлено, що за досліджуваний період середньорічний вміст PM<sub>2,5</sub> становив від 8 до 16,8 мкг/м<sup>3</sup>, PM<sub>10</sub> – від 14,4 до 29,2 мкг/м<sup>3</sup>. Виявлено сезонну динаміку з піковими концентраціями в опалювальний період. Для PM<sub>2,5</sub> зафіксовано перевищення допустимих значень до 1,2 разів у січні (25,05 мкг/м<sup>3</sup>) та листопаді (30,73 мкг/м<sup>3</sup>) 2020 р., лютому (29,77 мкг/м<sup>3</sup>) та березні (25,39 мкг/м<sup>3</sup>) 2021 р. Для PM<sub>10</sub> перевищення у 1,12 разів зафіксоване лише для листопада 2020 р. (56,24 мкг/м<sup>3</sup>).

На основі експериментальних даних оцінено ефективність поглинання забруднюючих частинок різними типами рослинності на зеленому даху площею 476,1 м<sup>2</sup>. Встановлено, що середні кущі та трав'янисті рослини, які займають 238,05 м<sup>2</sup>, забезпечують 50,6% загального поглинання завдяки оптимальному співвідношенню коефіцієнтів поглинання для PM<sub>2.5</sub> (0,85) та PM<sub>10</sub> (0,89). Газони та ґрунтопокривні рослини на площі 142,83 м<sup>2</sup> забезпечують 26,8% поглинання з коефіцієнтами 0,75 для PM<sub>2.5</sub> та 0,81 для PM<sub>10</sub>. Деревя та великі кущі, попри найменшу площу (95,22 м<sup>2</sup>), показують високу ефективність завдяки найвищим коефіцієнтам поглинання (0,95 для PM<sub>2.5</sub> та 0,97 для PM<sub>10</sub>), що забезпечили 22,6% загального поглинання.

Розраховано, що досліджуваний зелений дах здатний щорічно поглинати від 1122,47 до 1948,55 г забруднюючих частинок. Ефективність поглинання залежить від сезону року, типу рослинності та концентрації забруднюючих речовин у повітрі. Максимальна ефективність спостерігається в період активної вегетації та при підвищених концентраціях забруднювачів.

Результати дослідження мають практичне значення для оптимізації видового складу рослин на зелених дахах, розроблення нормативів з їх проєктування та планування міських програм покращення якості повітря. Запропонована методика оцінки ефективності очищення повітря може бути використана для подальших досліджень механізмів фітофільтрації в міському середовищі.

**Ключові слова:** зелені дахи, тверді частинки, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, якість повітря, фітофільтрація, міське середовище, екологічна ефективність.

**Assessment of the efficiency of green roofs in absorption of pm<sub>2.5</sub> and pm<sub>10</sub> solid particles in urban environment conditions.** *Herasymchuk L.O., Rybak O.S.*

The article presents the results of a study of the efficiency of PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub> particulate matter absorption by green roofs in urban environments. The study was conducted in the city of Zhytomyr using data from the Eco City public air quality monitoring network for 2020–2024. It was found that during the study period, the average annual PM<sub>2.5</sub> content

ranged from 8 to 16,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM10 – from 14,4 to 29,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Seasonal dynamics were found with peak concentrations during the heating season. For PM2,5, the permissible values were exceeded by up to 1,2 times in January (25,05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and November (30,73  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of 2020, February (29,77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and March (25,39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of 2021. For PM10, an excess of 1,12 times was recorded only for November 2020 (56,24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Based on experimental data, the efficiency of absorption of polluting particles by different types of vegetation on a green roof with an area of 476,1  $\text{m}^2$  was estimated. It was found that medium-sized shrubs and herbaceous plants, occupying 238,05  $\text{m}^2$ , provide 50,6% of the total absorption due to the optimal ratio of absorption coefficients for PM2,5 (0,85) and PM10 (0,89). Lawns and ground cover plants on an area of 142,83  $\text{m}^2$  provide 26,8% absorption with coefficients of 0,75 for PM2,5 and 0,81 for PM10. Trees and large shrubs, despite the smallest area (95,22  $\text{m}^2$ ), show high efficiency due to the highest absorption coefficients (0,95 for PM2,5 and 0,97 for PM10), providing 22,6% of the total absorption.

It is calculated that the studied green roof is capable of absorbing from 1122,47 to 1948,55 g of polluting particles annually. The absorption efficiency depends on the season of the year, the type of vegetation and the concentration of pollutants in the air. The maximum efficiency is observed during the period of active vegetation and at elevated concentrations of pollutants.

The results of the study are of practical importance for optimizing the species composition of plants on green roofs, developing standards for their design and planning urban air quality improvement programs. The proposed methodology for assessing the effectiveness of air purification can be used for further research into the mechanisms of phytofiltration in the urban environment.

**Keywords:** green roofs, particulate matter, PM2,5, PM10, air quality, phytofiltration, urban environment, environmental efficiency.

### Постановка проблеми

Натепер спостерігається підвищення рівня забруднення атмосферного повітря [1-4], в тому

числі твердими частинками PM2.5 та PM10, що становить серйозну загрозу для здоров'я населення міст [5, 6]. За даними ВООЗ, забруднення повітря дрібнодисперсними частинками призводить до понад 4,2 мільйонів передчасних смертей щорічно [7]. Особливо актуальним є пошук ефективних методів очищення повітря в умовах щільної міської забудови, де традиційні методи озеленення мають обмежене застосування.

### Актуальність дослідження

Зелені дахи представляють інноваційне рішення для покращення якості міського повітря, особливо в контексті змін клімату, зростаючої урбанізації та обмеженості наземних площ для озеленення [8–18, 22–23]. Дослідження їх ефективності в конкретних кліматичних умовах має важливе значення для розроблення стратегій поліпшення якості повітря.

### Зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Робота безпосередньо пов'язана з реалізацією стратегій сталого розвитку міст, підвищенням енергоефективності будівель та розвитком зеленої інфраструктури. Результати роботи можуть бути використані при розробленні міських програм озеленення та нормативних документів щодо впровадження зелених дахів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження Yang J. et al. (2001) наголошують на здатності зелених дахів поглинати значні об'єми забруднюючих частинок завдяки різним механізмам фітофільтрації. Kwak M. et al. (2023) підтвердили високу ефективність різних видів рослинності у затриманні PM2.5 та PM10. Дослідники Diener A. та Mudu P. (2021) довели, що ефективність поглинання залежить від морфологічних особливостей рослин. Дослідження Viesso M. та ін. (2021) показали важливість підбору оптимального складу рослин для максимальної ефективності очищення повітря.

## Невирішені частини загальної проблеми

Недостатньо вивченими залишаються питання ефективності поглинання різних типів рослинності в урбанізованих територіях.

## Новизна дослідження

Вперше проведено комплексну оцінку ефективності поглинання PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> різними типами рослинності на зеленому даху в умовах помірно континентального клімату України.

## Методологічне значення

Розроблено комплексний підхід з оцінки ефективності зелених дахів у очищенні повітря, що враховує різні типи рослинності та сезонні фактори. Інформаційною базою дослідження стала інформація щодо вмісту PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> за період 2020–2024 рр. за даними Української мережі громадського моніторингу якості повітря Eсо City в м. Житомир [19]. Обсяги зв'язування твердих часток зеленими дахами (г/м<sup>2</sup>/рік) здійснювали за методикою Yang J. та ін. (2008) [15], як добуток швидкості осідання частинок (PM<sub>2,5</sub>–0,0005, а для PM<sub>10</sub>–0,005 м/с), їх концентрації у повітрі за даними Eсоcity (г/м<sup>3</sup>), коефіцієнта поглинання рослинністю (дерева та великі кущі для PM<sub>2,5</sub>–0,95, для PM<sub>10</sub>–0,97, середні кущі та трав'янисті рослини – 0,85 та 0,89, газони та ґрунтопокривні – 0,75 та 0,81 відповідно) та часу впливу (с).

## Викладення основного матеріалу

Динаміка забруднення атмосферного повітря м. Житомир твердими частинками PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> в розрізі місяців за період 2020–2024 рр. представлена на рис. 1.

В розрізі окремих місяців найбільше значень, що перевищують гранично допустимі середньодобові концентрації, характерні для січня 2020 р. – 39,8%, 2021 р. – 47,8%, 2024 р. – 10,4% значень з максимальними перевищеннями у 1,2–2,8 рази, лютого 2020 р. – 32,5%, 2021 р. – 47,4% значень з максимальними перевищеннями у 1,2–3,2 рази, грудня 2020 р. – 31,8%, 2021 р. – 9,2%, 2022 р. – 10,5% з максимальними перевищеннями у 1,3–2,1 рази, березня 2020 р. – 31,6%, 2021 р. – 37,8%, 2024 р. – 30,6% з максимальними перевищеннями у 1,1–3,9 рази, квітня 2020 р. – 30,7%, 2021 р. – 21,3% значень з максимальними перевищеннями у 1,9–3,6 рази, жовтня 2020 р. – 26,7%, 2021 р. – 13,3% з максимальними перевищеннями у 1,2–1,9 разів та листопада 2020 р. – 56,4%, 2021 р. – 10,6% з максимальними перевищеннями у 2,1–4,9 рази.

За період 2020–2024 рр. середньорічний вміст PM<sub>10</sub> становив від 14,4 до 29,2 мкг/м<sup>3</sup> (рис. 1). Перевищення встановлених значень за PM<sub>10</sub> у 1,12 разів характерне лише для листопада (56,24 мкг/м<sup>3</sup>) 2020 р.

Вміст PM<sub>10</sub> має схожу з PM<sub>2,5</sub> тенденцію. В розрізі окремих місяців найбільше значень, що перевищують гранично допустимі середньодобові концентрації, характерні для січня 2020 р. – 38,2%, 2021 р. – 21,7% значень з максимальними

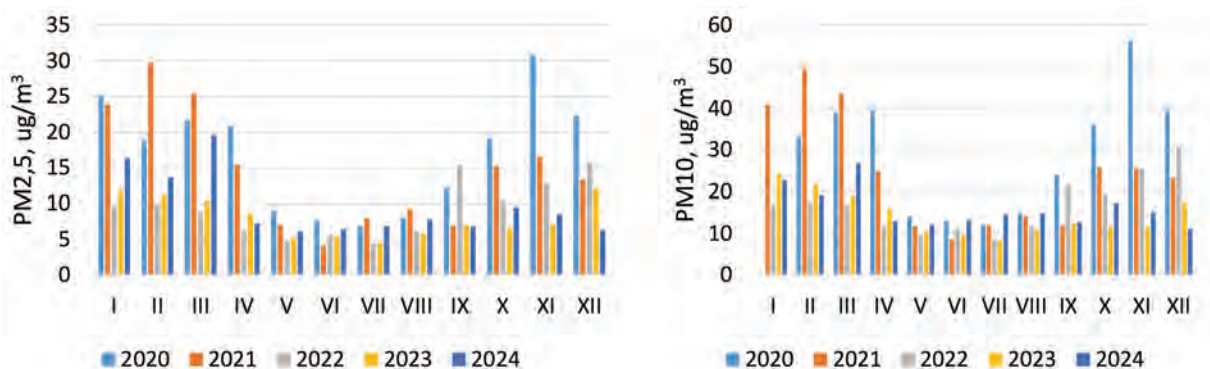


Рисунок 1. Динаміка забруднення атмосферного повітря м. Житомир твердими частинками PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> в розрізі місяців за період 2020–2024 рр.

перевищеннями у 1,1–2,7 рази, лютого 2020 р. – 19,4%, 2021 р. – 31,6% значень з максимальними перевищеннями у 1,7–2,6 рази, грудня 2020 р. – 13,6%, 2022 р. – 8,9% з максимальними перевищеннями у 1,6–2,2 рази, березня 2020 р. – 25%, 2021 р. – 21,6% з максимальними перевищеннями у 1,3–4,6 рази, квітня 2020 р. – 25,3% значень з максимальними перевищеннями у 1,1–2,1 рази, жовтня 2020 р. – 22,7%, 2021 р. – 8,9% з максимальними перевищеннями у 1,2–2,7 разів та ли-

стопада 2020 р. – 41%, 2021 р. – 7,6% з максимальними перевищеннями у 1,3–5,5 разів.

Зелений дах спроектований на території житлового кварталу м. Житомира.

Площа озеленення складає 476,1 м<sup>2</sup> та розподілена між трьома типами рослинності: дерева та великі кущі – 95,22 м<sup>2</sup> (20% площі), середні кущі та трав'янисті рослини – 238,05 м<sup>2</sup> (50%), газони та ґрунтопокривні – 142,83 м<sup>2</sup> (30%) (табл. 1).

Таблиця 1

## Проектні розміри, щільність та площа рослин для зеленого даху

Найменування українською	По проекту		Щільність, шт/м <sup>2</sup>	Площа, м <sup>2</sup>	Кількість, шт.
	h, см	d, см			
<i>Дерева</i>					
Клен татарський ( <i>Acer tataricum</i> )	600-800	600-800			8
Бузина чорна «Лациніата» (ф. парасоля) ( <i>Sambucus nigra «Laciniata»</i> )	250-300	150-200			22
<i>Кущі</i>					
Дерен білий «Елегантсіма» ( <i>Cornus alba «Elegantissima»</i> )	120-150		9	77,5	698
Гортензія деревовидна «Анабель» ( <i>Hydrangea arborescens «Annabelle»</i> )	120	80	4	92	368
Кизильник блискучий ( <i>Cotoneaster lucidus</i> )	60-100		9	33,3	300
Барбарис тунберга «Еректа» ( <i>Berberis thunbergii «Erecta»</i> )	100	60	9	5,1	46
Тис середній «Фармен» ( <i>Taxus media «Farmen»</i> )	40-50	30	9	93,6	842
Тис середній (ф. куля, Ø110) ( <i>Taxus media</i> )		110			
Тис середній (ф. куля, Ø80) ( <i>Taxus media</i> )	80-70	80	6		
Тис середній (ф. куля, Ø60) ( <i>Taxus media</i> )		60			
Тис середній (ф. куля, Ø35) ( <i>Taxus media</i> )		35	2		
<i>Багаторічники</i>					
Пахізандра верхівкова ( <i>Pachysandra terminalis</i> )	15-20	20	16	17,4	278
Щучка дерниста ( <i>Deschampsia cespitosa</i> )	30	50	9	7,70	69
Осока морроу «Айс Денс» ( <i>Carex morrowii «Ice Dance»</i> )	20-30	35	12	39,60	475
Перлівка трансільванська ( <i>Melica transsilvanica</i> )	45-50	75	9	27,60	248
Анемона японська «Вірлінд» ( <i>Anemone japonica «Whirlwind»</i> )	60-100		12	39,80	478
Хоста гібридна «Хальседон» ( <i>Hosta hybrida «Halcyon»</i> )	45-50	75	9	38,40	346
Астранція велика «Альба» ( <i>Astrantia major «Alba»</i> )	60-70	40	12	1,40	17
Короличка дрібна «Вайт Перл» ( <i>Cymbalaria sicula «White Pearl»</i> )	60-80		9	12,60	113
Тіарелла серцелиста ( <i>Tiarella cordifolia</i> )	20-30	35	12	6,60	79

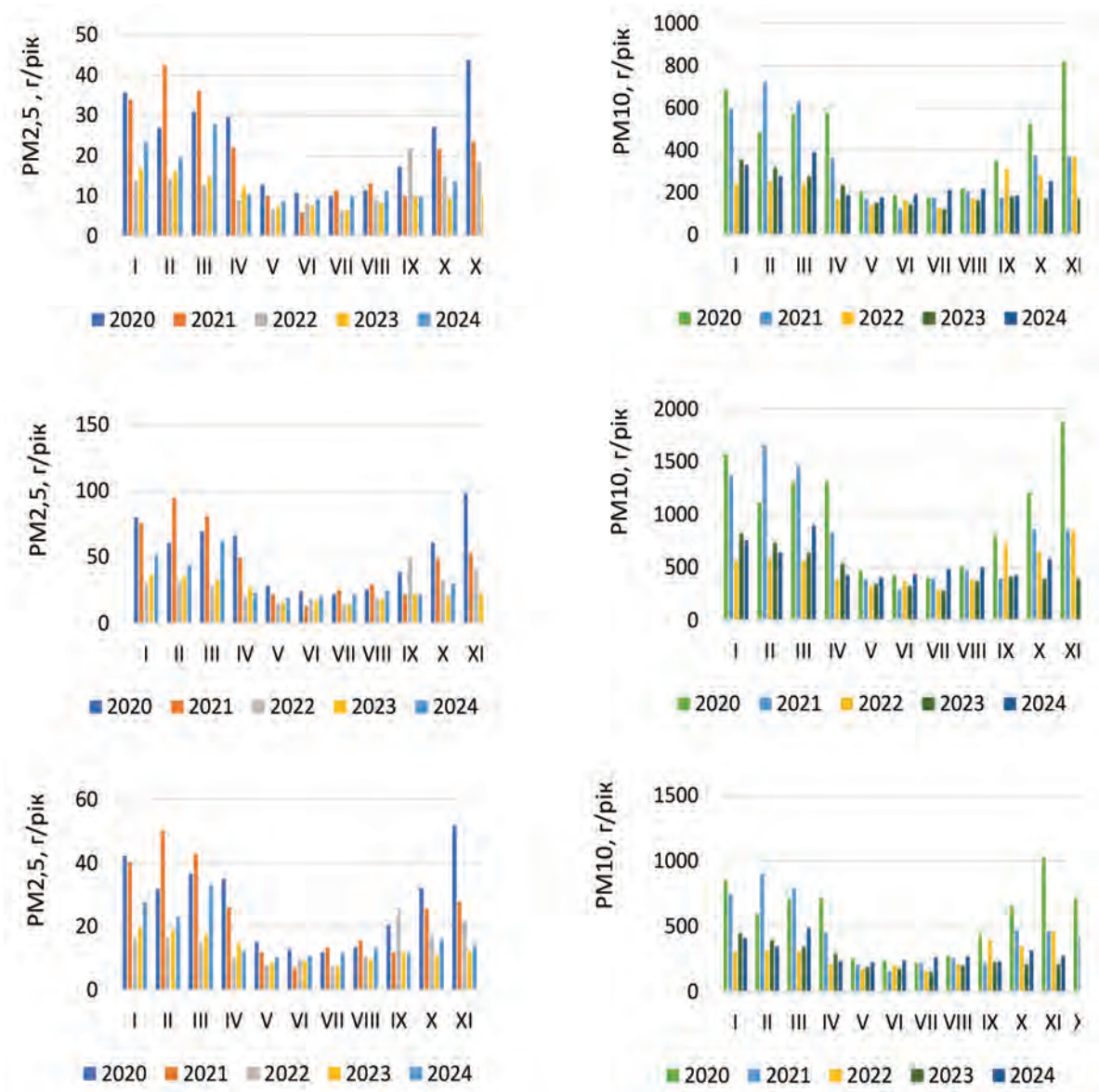


Рисунок 2. Зв'язування  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  зеленим дахом в розрізі місяців за період 2020–2024 рр.:  
 а – дерева та великі кущі; б – середні кущі та трав'янисті рослини;  
 в – газони та ґрунтопокривні рослини

Аналіз внеску різних типів рослинності показав, що найбільшу ефективність демонструють середні кущі та трав'янисті рослини, які займають площу  $238,05 \text{ м}^2$  і забезпечують  $50,6\%$  загального поглинання. Це пояснюється як значною площею, так і оптимальним співвідношенням коефіцієнтів поглинання для  $PM_{2,5}$  ( $0,85$ ) та  $PM_{10}$  ( $0,89$ ). Газони та ґрунтопокривні рослини площею  $142,83 \text{ м}^2$  забезпечують  $26,8\%$  загального поглинання, демонструючи дещо нижчі коефіцієнти поглинання ( $0,75$  для  $PM_{2,5}$  та  $0,81$  для  $PM_{10}$ ). Деревя та великі кущі, незважаючи

на найменшу площу ( $95,22 \text{ м}^2$ ), показують високу ефективність завдяки найвищим коефіцієнтам поглинання ( $0,95$  для  $PM_{2,5}$  та  $0,97$  для  $PM_{10}$ ), забезпечують близько  $22,6\%$  загального поглинання (рис. 2).

Такі результати підтверджують ефективність використання комбінованого підходу до озеленення даху, де різні типи рослинності доповнюють одне одного, що забезпечують максимальну ефективність очищення повітря від забруднюючих частинок різного розміру. Загальна площа зеленого даху в  $476,1 \text{ м}^2$  демонструє значний по-

тенціал у покращенні якості повітря міського середовища, здатна щорічно поглинати від 1122,47 до 1948,55 г забруднюючих частинок (рис. 2).

## Висновки

Зелений дах площею 476,1 м<sup>2</sup> здатний щорічно поглинати від 1122,47 до 1948,55 г твердих частинок PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub>, що підтверджує його високу ефективність у покращенні якості міського повітря. Найефективнішими для поглинання забруднюючих частинок виявились середні кущі та трав'янисті рослини, які забезпечують 50,6% загального поглинання завдяки оптимальному співвідношенню коефіцієнтів поглинання. Дослідження показало чітку сезонну динаміку ефективності очищення повітря з максимальними показниками в період активної вегетації рослин. Виявлено, що ефективність поглинання забруднюючих речовин прямо корелює з їх концентрацією в повітрі, що робить зелені дахи особливо ефективними в періоди підвищеного забруднення атмосферного повітря.

## Перспективи використання результатів

Результати можуть бути використані при плануванні стратегій сталого розвитку міст та розробленні комплексних програм адаптації до кліматичних змін. Практичне значення результатів полягає в можливості їх застосування при проектуванні нових та реконструкції існуючих будівель з метою створення більш екологічно чистого та комфортного міського середовища.

## Список використаних джерел

1. Герасимчук Л., Валерко Р., Розгон В., Малиновська В. Тенденції викидів діоксиду вуглецю як чинника кліматичних змін в атмосферне повітря Житомирської області від стаціонарних джерел та прогнозування їх обсягів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. №3. С. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.32782/psd-2023-3-7>.
2. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А. Інтегральний показник екологічного стану міста Житомир

як основа для встановлення тенденцій його розвитку. *Innovations in the Education of the Future: Integration of Humanities, Technical and Natural Sciences : International collective monograph*, FIT CTU in Prague. 2023. С. 160-181. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10259058>.

3. Herasymchuk L., Patseva I., Valerko R., Ustymenko V. Military actions in Ukraine as ecocide and challenge to Formulas of peace. *Present Environment and Sustainable Development*. 2024. Vol. 18, no 2. P. 927–938. DOI: <https://doi.org/10.47743/pesd2024182015>.

4. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Ярошенко Б.О., Члек О.М. Загрози довкілля внаслідок військових дій очима дітей. *Екологічні науки*. 2022. № 4 (43). С. 168-173. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.28>.

5. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. 285 p.

6. Cohen A.J., Brauer M., Burnett R. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*. 2017. Vol. 389. P. 1907–1918.

7. European Environment Agency. Air quality in Europe – 2023 report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. 104 p.

8. Романчук Л. Д., Герасимчук Л. О., Валерко Р. А. Використання сірої води зеленими дахами: системний аналіз та перспективи впровадження. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 10. С. 254-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.24>.

9. Валерко Р. А., Герасимчук Л. О., Бельмега І. В., Шацило Є. Г. Зелені дахи як напрям наукових досліджень. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агронімія і біологія»*. 2024. № 1(55). С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.1.5>.

10. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Весельський О.О. Переваги зелених дахів та їх розрахунок. *Аграрні інновації*. 2024. № 23 (2024). С. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.23.7>.

11. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацева І. Г. Прояв зміни температури повітря на території м. Житомир. *Вісник Харківського національного*

університету імені В.Н. Каразіна Серія «Екологія». 2023. Вип. 29. С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-01>.

12. Herasymchuk L.O., Valerko R.A. Coverage of climate change trends in Zhytomyr over a 19-year period. Scientific developments of Ukraine and EU in the area of natural science: Collective monograph. Riga: Baltija Publishing, 2020. P. 1. pp. 85-101. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-73-0/1.6>.

13. Рибак О. С. «Зелений дах-біорізноманіт-тя»: технології будівництва, утримання, обслу- говування та особливості контролю біотичної складової. *Вісник КрНУ імені Михайла Остро- градського*. 2023. № 5. С. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.5.4>.

14. Vijayaraghavan K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 57. P. 740–752. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.119>.

15. Yang J., Yu Q., Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. P. 7266–7273. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2008.07.003>. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00326-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00326-5).

16. Kwak M., Lee J., Park S., Lim Y., Kim H., Jeong S., Son J., Je S., Chang H., Oh C., Kim K., Woo S. Understanding Particulate Matter Retention and Wash-Off during Rainfall in Relation to Leaf Traits of Urban Forest Tree Species. *Horticulturae*. 2023. Vol. 9(2), 165. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020165>.

17. Diener A., Mudu P. How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on

green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective – with implications for urban planning.. *The Science of the total environment*. 2021. Vol. 796, 148605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605>.

18. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*. 2021. Vol. 204, 108120. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108120>.

19. Українська мережа громадського моні- торингу якості повітря Eco City [База даних ре- зультатів моніторингу]. Кабінет дослідника яко- сті повітря України. Івано-Франківськ: ГО «Фрі Ардуіно», 2025, 1195. 1223 КБ. У форматі CSV. URL: <https://archive.eco-city.org.ua>

20. Zhang L., Gong S., Padro J., Barrie L. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment*. 2001. Vol. 35. P. 549–560. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00326-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00326-5).

21. Dzierżanowski K., Popek R., Gawrońska H., Sæbø A., Gawroński S. Deposition of Particulate Matter of Different Size Fractions on Leaf Surfaces and in Waxes of Urban Forest Species. *International Journal of Phytoremediation*. 2011. Vol. 13. P. 1037–1046. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.552929>.

22. Getter K. L., Rowe D. B., Andresen J. A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*. 2009. Vol. 35(4). P. 674-686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>.

УДК 622.24:628.4+349.6

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-06>

## АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ЗАКОНОДАВЧОЇ БАЗИ ЩОДО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ БУРІННЯ ПРИ СПОРУДЖЕННІ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ВИДОБУВАННЯ НАФТИ ТА ГАЗУ

Івашенко Т. Г., Рижов Г. О.

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

t1313@ukr.net

nau.077@gmail.com

В статті проведено дослідження, щодо нормативно-правового забезпечення регулювання процесів управління відходами, що утворюються під час буріння свердловин для промислового видобутку нафти та газу в Україні. Було детально досліджено ключові аспекти екологічного регулювання, зокрема нормативні вимоги до збирання, транспортування, тимчасового зберігання, утилізації бурових відходів та відновлення порушених земель, а також інституційні механізми державного нагляду за діяльністю нафтогазових компаній. Результати дослідження підтвердили, що впровадження інноваційних методів утилізації, таких як біологічна рекультивация забруднених ділянок, багатоступенева фільтрація розчинів із застосуванням механіко-хімічних процесів, а також реінтеграція вторинних матеріалів у виробничі цикли, має суттєвий потенціал для зменшення екологічного навантаження та одночасної оптимізації витрат підприємств. Проте для реалізації цих переваг необхідне системне вдосконалення законодавчої бази, зокрема приведення національних норм у відповідність до стандартів Європейського Союзу, запровадження централізованого реєстру відходів із деталізованою класифікацією за рівнем небезпеки, а також посилення тиску на порушників екологічного законодавства через створення прозорих механізмів відповідальності. Авторами розроблені рекомендації, спрямовані на інтеграцію принципів циклічної економіки в управління відходами буріння, що передбачає системний перехід від лінійної моделі «видобуток-утилізація»

до замкнених циклів використання ресурсів. До ключових ініціатив належать стимулювання підприємств до використання вторинних матеріалів через податкові пільги, розроблення стандартів екологічної відповідальності для компаній сектору, а також створення інфраструктури для перероблення відходів із залученням міжнародних технологій. Отримані висновки підкреслюють критичну потребу в системних змінах: посиленні ролі держави у контролі за дотриманням екостандартів, активному впровадженні науково обґрунтованих методів управління відходами та формуванні правових умов для сталої взаємодії між бізнесом, громадами та органами влади.

**Ключові слова:** відходи буріння, нормативно-правове регулювання, екологічна безпека, нафтогазова галузь, утилізація та перероблення відходів, європейські екологічні стандарти.

**Analysis of the regulatory and legislative framework for drilling waste management in the construction of wells for oil and gas production.**  
*Ivashchenko T. Ryzhov H.*

The article conducted a study on the regulatory and legal support for the regulation of waste management processes generated during drilling wells for industrial oil and gas production in Ukraine. Key aspects of environmental regulation were studied in detail, in particular, regulatory requirements for the collection, transportation, temporary storage, disposal of drilling waste and restoration of disturbed lands, as well as institutional mechanisms for state supervision of the activities of oil and gas compa-

nies. The results of the study confirmed that the implementation of innovative disposal methods, such as biological remediation of contaminated sites, multi-stage filtration of solutions using mechanical and chemical processes, as well as the reintegration of secondary materials into production cycles, has significant potential for reducing the environmental load and simultaneously optimizing the costs of enterprises. However, to realize these benefits, it is necessary to systematically improve the legislative framework, in particular, to bring national norms into line with European Union standards, to introduce a centralized waste register with a detailed classification by hazard level, and to increase sanction pressure on violators of environmental legislation through the creation of transparent liability mechanisms. The authors have developed recommendations aimed at integrating the principles of a circular economy into drilling waste management, which involves a systematic transition from a linear «extraction-disposal» model to closed resource use cycles. Key initiatives include encouraging enterprises to use secondary materials through tax breaks, developing environmental responsibility standards for companies in the sector, and creating an infrastructure for waste processing with the involvement of international technologies. The findings highlight the critical need for systemic changes: strengthening the role of the state in monitoring compliance with environmental standards, actively implementing scientifically sound waste management methods, and creating legal conditions for sustainable interaction between business, communities, and government agencies.

**Keywords:** drilling waste, regulatory framework, environmental safety, oil and gas industry, waste disposal and recycling, European environmental standards.

### Постановка проблеми

Управління відходами, що утворюються в процесі буріння під час спорудження свердловин для видобування нафти та газу, становить один із найважливіших екологічних та техніко-економічних викликів для України, оскільки зростання обсягів розвідки та розроблення родовищ вуглеводнів створює додаткове навантаження на природне середовище, підвищує ризики забруднення ґрунтів,

водних ресурсів і атмосферного повітря, а також потребує впровадження ефективних методів поводження з відходами відповідно до міжнародних екологічних стандартів, що регулюють безпечну утилізацію та перероблення подібних відходів.

Актуальність цього дослідження полягає у необхідності детального аналізу чинних нормативних актів, що регулюють управління відходами буріння, з метою виявлення наявних прогалин, оцінки відповідності правових норм сучасним екологічним та технологічним вимогам, а також розробленню пропозицій щодо вдосконалення законодавчого регулювання у цій сфері, що дозволить підвищити рівень екологічної відповідальності підприємств нафтогазової галузі, забезпечити дотримання міжнародних зобов'язань України у сфері екологічної безпеки, а також сприятиме реалізації концепції сталого розвитку шляхом гармонізації екологічних, економічних та соціальних інтересів суспільства.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У праці авторства Вен Ю., Вей П., Дін Дж., Чжао Л. [1], розкриваються технологічні аспекти утворення відходів буріння, їх складу та методів утилізації, що спрямовані на зменшення негативного впливу цих відходів на природне середовище; особливо загострюється увага на важливості рекультиватії земельних ділянок після завершення видобувальних робіт, а також на можливостях повторного використання бурових розчинів для оптимізації виробничих процесів.

Чинне законодавство України у сфері управління відходами буріння детально проаналізовано в наукових роботах Аблеєвої І., Пляцука Л. [2], Яцишина В. [3], де виявлено серію правових колізій, недостатню адаптацію місцевого законодавства до європейських стандартів та відсутність ефективних механізмів контролю за виконанням екологічних нормативів; автори акцентують увагу на необхідності глибокого перегляду існуючого правового поля, включають вдосконалення законодавчих актів та посилення державного нагляду над поводженням з буровими відходами.

Міжнародний досвід регулювання цієї сфери розглядається у дослідженні Альбельдаві М. [4],

який систематизував нормативні акти США, Канади та країн ЄС, що встановлюють чіткі вимоги до зберігання, транспортування та утилізації відходів буріння; у цих дослідженнях особливо підкреслюється значення впровадження комплексних систем екологічного моніторингу, а також використання інноваційних технологій для перероблення бурових шламів та інших продуктів вторинного утворення.

Наукова література також широко обговорює питання впливу бурових відходів на стан навколишнього середовища та здоров'я населення, що підтверджується результатами численних екологічних досліджень, проведених як в Україні, так і за кордоном; наприклад, у праці, Журавська Н., Стефанович І., Стефанович П., Негрій Т. [5], та група авторів Сенюшкович М., Тершак Б., Витвицький І., Марцинків О. [6] детально розкрито екологічні ризики, пов'язані з управлінням буровими відходами, та актуалізовано потребу в розробленні більш строгих екологічних нормативів для нафто та газовидобувних підприємств. Загалом, аналіз наявної наукової бази свідчить про первісну актуальність проблеми правового регулювання управління буровими відходами в Україні, а також забезпечення екологічної безпеки при утилізації та перероблення відходів після проведення буріння.

**Мета** статті – дослідити нормативно-правову базу України щодо поводження з відходами буріння при будівництві свердловин для видобутку нафти й газу, а також виявити головні проблеми та недоліки у законодавстві, які впливають на ефективність цього процесу.

#### **Завдання дослідження:**

- проаналізувати нормативно-правові документи України, а також міжнародні екологічні стандарти, регламентуючі процедури управління буровими відходами, з метою оцінки їхньої сумісності з сучасними технологічними вимогами та глобальними практиками;
- визначити основні проблеми та правові колізії, присутні у чинному законодавстві, які створюють перешкоди для ефективного управління відходами буріння та можуть призвести до екологічних ризиків для навколишнього середовища;

- обґрунтувати потребу в інтеграції міжнародного досвіду та подальшому удосконаленні національної нормативно-правової бази, щоб підвищити рівень екологічної безпеки та оптимізувати систему управління буровими відходами;
- розробити практичні пропозиції щодо покращення нормативно-правового регулювання у даній сфері, враховуючи необхідність посилення механізмів контролю за виконанням екологічних норм та стандартів.

#### **Викладення основного матеріалу**

Попри те, що нормативно-законодавча база України у сфері управління буровими відходами є доволі розгалуженою та містить низку положень, які регламентують основні аспекти їхнього збирання, транспортування, зберігання, утилізації та рекультивациі земель, її практична ефективність залишається предметом широкої дискусії, оскільки чинне законодавство характеризується наявністю певних правових суперечностей, недостатньою адаптацією до сучасних технологічних викликів, а також слабкими механізмами державного контролю за дотриманням екологічних норм та стандартів, що в сукупності ускладнює реалізацію екологічно безпечних і ресурсозберігаючих підходів до поводження з буровими відходами на території України.

Промисловий видобуток нафти та газу на території сучасної України, який сходить своїми коренями до глибокої давнини, залишається важливим економічним чинником, проте його екологічні наслідки потребують ретельного аналізу. Слід підкреслити, що використання природного газу в промисловості та побуті, порівняно з традиційними енергоносіями – вугіллям, нафтою, торфом чи дровами, – характеризується значно меншим негативним впливом на екосистеми, що робить його відносно екологічно більш прийнятним ресурсом. Проте сам процес видобування цих корисних копалин, навіть у найвіддаленіших та малозаселених регіонах, несе суттєві ризики для навколишнього середовища, які багаторазово зростають у разі проведення робіт у густонаселених районах через потенційне забруднення повітря, ґрунтів та водних ресурсів [7]. Особливу небезпеку становлять геологороз-

відувальні та бурові роботи в зонах зі складними ландшафтними умовами, активними гідрологічними процесами, наявністю карстових порожнин чи розгалуженими підземними та наземними водними системами, оскільки такі дії можуть порушити крихкий природний баланс, спричинивши незворотні зміни як з екологічної, так і з антропогенної перспективи.

Основними напрямками виробничої діяльності нафтогазової промисловості України, які мають суттєву екологічну складову, є: геологічна розвідка надр, підготовка до буріння свердловин, сам процес буріння, капітальний ремонт існуючих газових або нафтових свердловин, стимуляція видобутку вуглеводнів з проблемних свердловин, здійснення гідророзриву пластів, управління відходами, передача їх власнику чи орендарю.

Процес видобутку вуглеводнів вимагає значного використання як земельних ресурсів, так і прісної води, що створює комплексне екологічне навантаження на навколишнє середовище. Особливу увагу варто приділити проблемі управління буровими відходами, які включають як тверду, так і рідку фази, а також стічні води, що утворюються в результаті технологічних операцій [8]. Рівень небезпеки даних відходів безпосередньо залежить від хімічного складу застосовуваних бурових розчинів, які є складними багатокомпонентними дисперсними системами, що поєднують емульсії, суспензії та аеровані рідкі речовини, призначені для промивання свердловин під час буріння [10]. Буровий розчин виконує безліч функцій: він очищає стінки свердловини від забруднюючих опадів, вимиває пробурені породи, виводить їх на поверхню, сприяє інтенсифікації руйнування гірських порід у робочій зоні, забезпечує якісне розкриття продуктивного горизонту та вирішує безліч інших технічних завдань. Після завершення процесу буріння, використаний буровий розчин разом з вибуреною породою потрапляє в категорію бурових відходів через систему очищення бурових розчинів, стаючи однією з основних складових маси відходів [9].

Згідно з Законом України «Про управління відходами», який набрав чинності у 2023 році, підприємства, що діють у нафтогазовій галузі, зобов'язані повністю виконувати нові регуляторні вимоги, що передбачають отримання необхід-

них дозволів, організацію системного обліку та звітності, а також впровадження сучасних технологічних рішень для зменшення антропогенного впливу на довкілля [11].

Крім того, постановою Кабінету Міністрів України від 5 грудня 2023 року № 1278 були затверджені Ліцензійні умови провадження господарської діяльності з управління небезпечними відходами, де детально визначено вимоги до матеріально-технічної бази підприємств, кваліфікації персоналу та технологічного оснащення, необхідного для безпечного управління відходами буріння, що має ключове значення для забезпечення екологічної безпеки.

Постановою Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2023 року № 1120 було затверджено Порядок класифікації відходів та Національний перелік відходів, який встановлює конкретні критерії та процедури для визначення рівня небезпеки відходів буріння; це дає змогу організовувати їх управління відповідно до категорії небезпеки, що сприяє мінімізації шкідливих факторів для довкілля та захисту здоров'я населення [12].

Нарешті, Правила розробки нафтових і газових родовищ, затверджені наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 15 березня 2017 року № 118, зобов'язують підприємства забезпечувати екологічну безпеку на всіх етапах розробки, включаючи буріння свердловин, через впровадження спеціальних заходів для запобігання забрудненню навколишнього середовища відходами буріння та організації їх коректної утилізації [13].

Щодо законодавчого регулювання цієї сфери, то Закон України «Про нафту і газ» від 12 липня 2001 року № 2665-III, узгоджений з положеннями Європейських Директив, встановлює суворі вимоги до суб'єктів господарювання, зокрема щодо мінімізації екологічних ризиків під час видобутку, транспортування та перероблення вуглеводнів. Відповідно до статті 9 органи місцевого самоврядування наділені повноваженнями контролювати процеси геологічного дослідження надр, експлуатації родовищ, логістики та зберігання продуктів перероблення, що підкреслює їхню ключову роль у запобіганні екологічних загроз [2]. Хоча основна відповідальність за дотримання екостандартів покладена на промислові підприємства, саме місцеві влади, через свої

регуляторні функції та знання регіональних особливостей, мають забезпечувати гармонізацію господарської діяльності з принципами сталого розвитку, тим самим зменшуючи антропогенний тиск на екосистеми.

У межах своєї компетенції місцеві органи влади мають право надавати згоду на розміщення об'єктів нафтогазового комплексу відповідно до законодавства за умови, що зона екологічного впливу цих об'єктів охоплює підпорядковану їм територію. Крім того, вони зобов'язані брати участь у розробленні комплексних планів щодо

забезпечення споживачів природним газом та нафтою на території свого управління, а також у створенні та реалізації системи заходів для функціонування нафтогазових об'єктів у надзвичайних ситуаціях [14].

Відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», громадськість отримала можливість висловлювати будь-які зауваження, заперечення та пропозиції, що значно розширює їхню участь у процесі оцінки екологічного впливу планованої діяльності суб'єктів господарювання [15].

Таблиця 1

### Шляхи покращення нормативної та законодавчої бази України в напрямку управління відходами буріння (сформовано авторами)

Напрямок покращення	Рекомендації щодо законодавчих змін	Вплив на екологічну безпеку	Оціночний еколого-економічний ефект	Оціночний період отримання позитивного ефекту
Гармонізація законодавства з міжнародними екологічними стандартами	Прийняття нових нормативних актів відповідно до Директив ЄС	Зменшення забруднення та відповідність міжнародним нормам	Підвищення інвестиційної привабливості та екологічної стійкості	3-5 років
Посилення державного контролю за поводженням з буровими відходами	Введення системи екологічного аудиту та посилення санкцій	Зниження випадків незаконної утилізації відходів	Зменшення витрат на ліквідацію екологічних наслідків	2-4 роки
Створення фінансових стимулів для екологічно безпечної утилізації	Запровадження податкових пільг та субсидій для підприємств	Скорочення кількості небезпечних відходів у навколишньому середовищі	Оптимізація витрат підприємств та підвищення ефективності управління	3-6 років
Розробка нових технологічних рішень для переробки бурових відходів	Законодавче стимулювання інноваційних екологічних технологій	Мінімізація ризиків забруднення ґрунтів та водних ресурсів	Зниження екологічного навантаження та витрат на рекультивацию	5-7 років
Удосконалення методів моніторингу впливу бурових відходів	Впровадження єдиної бази даних для оцінки впливу відходів	Більш ефективне управління екологічними ризиками	Покращення екологічного моніторингу та економія ресурсів	3-5 років
Зміцнення відповідальності підприємств за екологічні порушення	Підвищення штрафів та посилення вимог до екологічного контролю	Зниження рівня шкідливих викидів та покращення стану довкілля	Зменшення витрат економіки через екологічні катастрофи	2-4 роки

Цей закон також передбачає процедуру постпроектного моніторингу, яка застосовується у випадках, коли це зазначено у висновку про екологічну експертизу, щоб виявити можливі відхилення між прогнозованими рівнями впливу на навколишнє середовище та фактичними результатами, а також для впровадження заходів щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища [16]. На основі проведеного аналізу як нормативної, так законодавчої бази, доцільно визначити шляхи покращення управління відходами буріння, при монтажі свердловин для промислового видобутку нафти та газу (табл. 1).

Отримані результати дослідження демонструють, що для ефективного управління буровими відходами необхідно реалізувати комплексний підхід, який охоплює не тільки подальше удосконалення правової бази, але й масштабне впровадження сучасних екологічних технологій, що мають потенціал підвищити ступінь екологічної відповідальності підприємств, значно зменшити антропогенний вплив на навколишнє середовище та сприяти формуванню умов для сталого розвитку нафтогазового сектору України.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень**

Результати проведеного дослідження свідчать про те, що управління відходами буріння під час спорудження свердловин для видобування нафти та газу є одним із ключових факторів, які визначають екологічну безпеку та сталість розвитку нафтогазового сектору України. Оскільки процес видобутку вуглеводнів, слід супроводжувати комплексним підходом стосовно оброблення значних обсягів твердих та рідких відходів, що утворюються внаслідок цих операцій і можуть мати негативний вплив на навколишнє середовище. У ході дослідження було детально проаналізовано основні законодавчі акти та нормативно-правові документи, що регулюють питання поводження з відходами буріння, а також міжнародні стандартні вимоги, які встановлені для контролю за безпечним управлінням небезпечними відходами у нафтогазовій галузі; особлива увага приділялася механізмам класифікації таких відходів за рівнем їхньої небезпеки, мето-

дам оцінки потенційного екологічного ризику та технологічним рішенням, що забезпечують мінімізацію негативного впливу на природні екосистеми через раціональне використання природних ресурсів. На базі отриманих результатів, було обґрунтовано потребу у подальшому удосконаленні нормативно-правового поля у сфері управління буровими відходами, що передбачає гармонізацію українського законодавства з європейськими екологічними стандартами, посилення державного нагляду за виконанням екологічних норм та створення стимулюючих механізмів для підприємств, що активно впроваджують екологічно безпечні технології перероблення та утилізації відходів буріння, що дозволить знизити негативний вплив на довкілля.

Сформульовані рекомендації щодо покращення системи управління буровими відходами, які включають запровадження більш ефективної системи екологічного моніторингу, застосування новітніх технологій для зменшення кількості утворюваних небезпечних відходів та вдосконалення механізмів їхньої утилізації, враховуючи найкращі міжнародні практики, що сприятиме формуванню більш екологічно орієнтованого підходу до діяльності нафтогазового сектору України.

### **Список використаних джерел**

1. Wen Y., Wei P., Ding J., Zhao L. Study on well control and killing in deep well drilling. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. no 859(1). P. 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/859/1/012059>
2. Аблесва І. Ю., Пляцук Л. Д. Системний підхід до підвищення екологічної безпеки нафтовидобувних територій: монографія. Суми: Сумський державний університет, 2021. 275 с.
3. Яцишин В. В. Еколого-економічне обґрунтування управління відходами буріння нафтових і газових свердловин: дис. ... д-ра екон. наук: 08.00.06 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2021. URL: [https://nung.edu.ua/sites/default/files/2021-02/dysdoct\\_yatsyshyn.pdf](https://nung.edu.ua/sites/default/files/2021-02/dysdoct_yatsyshyn.pdf)
4. Albeldawi M. Environmental impacts and mitigation measures of offshore oil and gas activities.

Developments in Petroleum Science. 2023. No 78. P. 313–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99285-5.00002-8>.

5. Журавська Н. Е., Стефанович І. С., Стефанович П. І., Негрій Т. О. Екологічна безпека у нафтогазовій галузі. Науковий вісник ДонНТУ. 2023. № 1(10). С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-63-68>.

6. Сенюшкович М. В., Тершак Б. А., Витвицький І. І., Марцинків О. Б. Спеціальні тампонажні системи. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. 407 с.

7. Zhuravska N., Stefanovich P., Stefanovich I., Pereginets I. Economic development and modern management: Concepts of management of modern innovative environmentally friendly production in the direction of sustainable development. Monographic series «European Science». Book 7. Part 2. Karlsruhe: ScientificWorldNetAkhatAV, 2021. 111 p. URL: <https://www.sworld.com.ua/monoge4/mge4-2.pdf>.

8. Ковалко О. М., Хомик П. М., Андрієвський А. В., Трусова М. В. Пріоритетні напрями актуалізації системи стандартизації в нафтогазовій галузі. Нафтогазова галузь України. 2016. №2. с. 5–8.

9. Екологічна безпека. Охорона природи. Буріння свердловин. Загальні вимоги: ДСТУ 41-00032626-00-007-97. Київ: Держнафтогазпром, 1997. 15 с.

10. Постанова Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2023 року № 1120 «Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів». Офіційний вісник України. 2023. № 85. Ст. 2742. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1120-2023-п>

11. Закон України «Про управління відходами» від 5 березня 1998 року № 187/98-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1998. № 36–37. Ст. 242. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-вр>

12. Постанова Кабінету Міністрів України від 5 грудня 2023 року № 1278 «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з управління небезпечними відходами». Офіційний вісник України. 2023. № 98. Ст. 3175. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1278-2023-п>

13. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 15 березня 2017 року № 118 «Про затвердження Правил розробки нафтових і газових родовищ». Офіційний вісник України. 2017. № 29. Ст. 892. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0423-17>

14. Банк Р.О., Німець Н.М. Деякі аспекти підготовки звітів з оцінки впливу на довкілля у сфері газовидобутку. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2024. № 2. С. 5–12. DOI: 10.20998/2220-4784.2024.02.01.

15. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25 червня 1991 року № 1264-ХІІ. Відомості Верховної Ради УРСР. 1991. № 41. Ст. 546. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12>

16. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunenko N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.

# СТРАТЕГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ ВПРОВАДЖЕННЯ МОНІТОРИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ВИДОБУТКУ ГРАНІТУ: SWOT ТА PEST-АНАЛІЗ

Пацева І. Г., Медвідь О. В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005

*rig@ztu.edu.ua;*

*ke\_mov@ztu.edu.ua*

У статті представлено стратегічний аналіз передумов для впровадження моніторингових досліджень водних об'єктів, які зазнають впливу діяльності гранітних кар'єрів. В умовах інтенсивного видобування природних ресурсів моніторинг стає ключовим інструментом для забезпечення екологічної безпеки та сталого використання водних ресурсів. У рамках дослідження застосовано два методи стратегічного аналізу – SWOT та PEST.

SWOT-аналіз дозволив ідентифікувати сильні та слабкі сторони впровадження моніторингових досліджень, а також визначити можливості й загрози для реалізації таких проєктів. До сильних сторін віднесено наявність базових даних щодо стану водних об'єктів, розвинуту нормативно-правову базу та доступ до сертифікованих лабораторій для проведення якісного аналізу проб води. Водночас, серед слабких сторін визначено недостатнє фінансування екологічних програм, обмеженість автоматизованих систем контролю та нерегулярність моніторингових досліджень, що ускладнює аналіз динаміки забруднення.

Аналіз можливостей показує, що перспективи залучення міжнародного співробітництва, включно з адаптацією до європейських стандартів (Водна рамкова директива 2000/60/ЄС), а також впровадження сучасних технологій, таких як сенсори для моніторингу в реальному часі, автоматизовані станції та геоінформаційні сис-

теми (ГІС). Водночас загрозами є економічні обмеження, низька екологічна свідомість частини населення та зростаюче антропогенне навантаження на водні ресурси через розширення гірничодобувної діяльності.

PEST-аналіз зосереджує увагу на зовнішніх чинниках, які впливають на впровадження моніторингових систем. Політичний аспект охоплює нормативно-правову базу, що регулює охорону довкілля, а також необхідність адаптації до стандартів ЄС. Економічні чинники вказують на високу вартість моніторингового обладнання, лабораторних досліджень і потребу в міжнародному фінансуванні для модернізації інфраструктури. Соціальний компонент акцентує увагу на важливості залучення громадськості до моніторингових програм, тоді як технологічний аспект вимагає впровадження автоматизованих систем, оцифрування даних і створення інтегрованих баз для аналізу результатів.

Результати дослідження підкреслюють важливість інтегрованого підходу до моніторингу водних об'єктів у районах видобування граніту. Для забезпечення стійкості водних ресурсів рекомендовано впроваджувати передові технології, залучати міжнародний досвід, посилювати екологічний контроль і розширювати участь громадськості. Виконання цих рекомендацій дозволить знизити негативний вплив видобувної діяльності на довкілля та сприятиме сталому управлінню природними ресурсами.

**Ключові слова:** малі річки, індекс забрудненості води (ІЗВ), екологічна оцінка, сталий розвиток, водні об'єкти, екологічна безпека, SWOT та PEST-аналізи.

**Strategic analysis of the prerequisites for the implementation of monitoring studies of water bodies with regard to granite mining: SWOT and PEST analysis.** *Patseva I., Medvid O.*

The article presents a strategic analysis of the prerequisites for the implementation of monitoring studies of water bodies affected by granite quarrying. In the context of intensive extraction of natural resources, monitoring becomes a key tool for ensuring environmental safety and sustainable use of water resources. The study used two methods of strategic analysis - SWOT and PEST.

The SWOT analysis allowed us to identify the strengths and weaknesses of the implementation of monitoring studies, as well as to identify opportunities and threats to the implementation of such projects. The strengths include the availability of basic data on the state of water bodies, a developed regulatory framework, and access to certified laboratories for high-quality analysis of water samples. At the same time, the weaknesses identified include insufficient funding for environmental programmes, limited automated control systems, and irregular monitoring studies, which complicates the analysis of pollution dynamics.

The analysis of opportunities shows prospects for international cooperation, including the adaptation of European standards under the EU Water Framework Directive, as well as the introduction of modern technologies such as sensors for real-time monitoring, automated stations and geographic information systems (GIS). At the same time, threats include economic constraints, low environmental awareness among the population, and the growing anthropogenic pressure on water resources due to the expansion of mining activities.

PEST analysis focuses on external factors that influence the implementation of monitoring systems. The political aspect covers the legal framework governing environmental protection and the need to adapt to EU standards. Economic factors point to the high cost of monitoring equipment, laboratory tests and the need for international funding to modernise infrastructure. The social component emphasises the

importance of involving the public in monitoring programmes, while the technological aspect requires the introduction of automated systems, digitalisation of data and the creation of integrated databases for analysing results.

The study results highlight the importance of an integrated approach to monitoring water bodies in granite mining areas. To ensure the sustainability of water resources, it is recommended to introduce advanced technologies, attract international experience, strengthen environmental control and expand public participation. Implementation of these recommendations will reduce the negative environmental impact of mining activities and promote sustainable management of natural resources.

**Keywords:** small rivers, water pollution index (WPI), environmental assessment, sustainable development, water bodies, environmental safety, SWOT and PEST analyses.

### Актуальність дослідження

Видобування граніту є важливим сектором економіки України, але водночас воно супроводжується значним антропогенним навантаженням на довкілля, зокрема на водні об'єкти. Впровадження ефективної системи моніторингу водних ресурсів у зонах гірничодобувної діяльності є стратегічно важливим для збереження екосистем і забезпечення екологічної безпеки.

Цей стратегічний аналіз включає розгляд екологічних, економічних, соціальних, технологічних і законодавчих передумов, що визначають необхідність моніторингу.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Видобування граніту є важливою складовою економічної діяльності, проте цей процес часто супроводжується значним впливом на навколишнє середовище, зокрема на водні ресурси. Забруднення водних об'єктів, яке виникає через скиди зворотних вод, ерозію ґрунтів, потрапляння хімічних речовин і зміну гідрологічного режиму, становить серйозну екологічну проблему. Впровадження систематичних моніторингових

досліджень водних об'єктів є стратегічно важливим кроком для забезпечення екологічної безпеки та стійкого розвитку регіонів із видобуванням граніту. Аналіз передумов для впровадження таких досліджень включає розгляд екологічних, технологічних, економічних, соціальних і правових аспектів.

Екологічні передумови обґрунтовуються необхідністю збереження водних ресурсів і екосистем, які є чутливими до антропогенного навантаження. Видобуток граніту призводить до збільшення вмісту зважених часток, важких металів, сульфатів, нітратів та інших хімічних сполук у воді, що спричиняє деградацію екосистем, зниження біорізноманіття, погіршення якості питної води та ризику для здоров'я людей. Зокрема, у зоні діяльності кар'єрів спостерігається підвищення концентрацій заліза, свинцю, кадмію та органічних речовин у воді, що може мати довгострокові наслідки. Моніторинг дозволить виявляти ці проблеми на ранніх стадіях і оперативно розробляти заходи з їх усунення.

Технологічні передумови пов'язані з доступністю сучасних засобів для проведення моніторингових досліджень. Нині існують автоматизовані системи, які дозволяють проводити безперервний моніторинг якості води, фіксуючи зміни фізико-хімічних і біологічних параметрів у реальному часі. Встановлення таких станцій у стратегічно важливих точках водних об'єктів поблизу кар'єрів, забезпечить більш точне надання даних для аналізу. Крім того, лабораторні технології дозволяють проводити детальний хімічний аналіз проб води, виявляючи навіть мікроконцентрації забруднювальних речовин. Однак для впровадження таких систем необхідно забезпечити фінансування і кваліфікований персонал.

Економічні передумови враховують значення раціонального використання природних ресурсів для сталого розвитку. Забруднення водних об'єктів призводить до зростання витрат на їх очищення, зниження продуктивності рибного господарства та сільського господарства, а також до економічних втрат через погіршення стану довкілля. У той же час, впровадження моніторингу дозволяє підприємствам уникати штрафів за порушення екологічного законодавства, підвищувати ефективність управління виробничими процесами та мінімізувати ризики аварійних

ситуацій. Довгострокова економічна вигода від моніторингу переважає над витратами на його впровадження.

Соціальні передумови обумовлені необхідністю захисту здоров'я людей і підвищенням екологічної свідомості населення. Забруднення водних об'єктів у зонах видобування граніту може негативно впливати на якість питної води та здоров'я місцевих мешканців. Це викликає соціальну напругу і може призвести до протестів проти діяльності кар'єрів. Регулярний моніторинг і відкритість результатів досліджень сприятимуть зміцненню довіри громади до підприємств і органів влади. Важливим є також залучення громадськості до екологічного моніторингу, що сприятиме формуванню відповідального ставлення до довкілля.

Правові передумови базуються на національному та міжнародному екологічному законодавстві. В Україні існує низка нормативних актів, які регулюють контроль за якістю води в поверхневих об'єктах, зокрема Водний кодекс України та закони про охорону навколишнього середовища. Водночас необхідно вдосконалити механізми реалізації цих норм і посилити відповідальність за недотримання екологічних стандартів. Впровадження моніторингу також відповідає міжнародним стандартам, зокрема Водній рамковій директиві ЄС, що є важливим для інтеграції України до європейського екологічного простору.

### **Викладення основного матеріалу**

Розробка системи моніторингових досліджень водних об'єктів у районах видобування граніту є важливим кроком для забезпечення екологічної стійкості. SWOT-аналіз допомагає оцінити передумови впровадження моніторингових досліджень, виявити сильні та слабкі сторони, а також визначити можливості й загрози для цього процесу. SWOT-аналіз – це метод оцінки сильних і слабких сторін, можливостей і загроз, пов'язаних із моніторингом водних об'єктів у зонах видобування граніту. Даний підхід допоможе визначити ключові напрями для покращення системи моніторингу водних об'єктів із урахуванням специфіки діяльності гірничодобувних підприємств. Результати SWOT-аналіз

Таблиця 1

**SWOT-аналіз передумов впровадження інноваційних програм поводження з відходами**

	Позитивний вплив	Негативний вплив
Внутрішнє середовище	<b>Сильні сторони (Strengths)</b>	<b>Слабкі сторони (Weaknesses)</b>
	A1. Наявність базових даних про водні ресурси A2. Технічна база для лабораторних досліджень A3. Законодавча основа A5. Підтримка громадських ініціатив	B1. Нерегулярність моніторингу B2. Обмежена доступність технологій B3. Недостатнє фінансування B4. Брак кваліфікованих кадрів B5. Відсутність інтегрованого підходу
Зовнішнє середовище	<b>Можливості (Opportunities)</b>	<b>Загрози (Threats)</b>
	C1. Впровадження автоматизованих систем моніторингу C2. Залучення міжнародного досвіду C3. Розширення громадського контролю C4. Модернізація лабораторій C5. Розвиток екологічного законодавства	D 1. Зростання антропогенного навантаження D 2. Кліматичні зміни D 3. Економічні виклики D 4. Недотримання екологічних норм підприємствами D 5. Вторинне забруднення

передумов впровадження інноваційних програм моніторингу впливу видобутку граніту на водні об'єкти наведено в табл. 1.

**Сильні сторони**

Сильні сторони впровадження моніторингових досліджень включають наявність базових даних щодо якості води, які вже накопичені у регіонах із активним видобуванням граніту.

Існуючі лабораторії мають технічну базу, що дозволяє проводити аналіз фізико-хімічних, біологічних і мікробіологічних параметрів води, таких як концентрація нітратів, важких металів, органічного забруднення та інші показники.

Наявна законодавча база, включаючи Водний кодекс України, встановлює чіткі нормативи для якості води, що створює правове підґрунтя для впровадження моніторингових систем. Крім того, активна участь громадських організацій у моніторингу забезпечує суспільний контроль, що підсилює прозорість процесу:

1. *Наявність базових даних про водні ресурси.*
2. *Технічна база для лабораторних досліджень.*
3. *Законодавча основа.*
4. *Підтримка громадських ініціатив.*

**Слабкі сторони**

Стримують впровадження ефективних моніторингових досліджень. Однією з головних проблем є нерегулярність моніторингу, що не враховує сезонних коливань і пікових періодів забруднення. У багатьох випадках фінансування екологічних програм є недостатнім, що обмежує можливості модернізації лабораторного обладнання та створення автоматизованих систем моніторингу. Також бракує кваліфікованих кадрів, особливо в сільських регіонах, де розташовані кар'єри. Дані, зібрані різними організаціями, часто не інтегруються в єдину базу, що ускладнює стратегічний аналіз:

1. *Нерегулярність моніторингу.*
2. *Обмежена доступність технологій.*
3. *Недостатнє фінансування.*
4. *Брак кваліфікованих кадрів.*
5. *Відсутність інтегрованого підходу.*

**Можливості**

Існує широкий спектр можливостей для підвищення ефективності моніторингових досліджень. Зокрема, впровадження автоматизованих систем моніторингу з використанням сенсорів дозволить проводити аналіз води в режимі реального часу. Міжнародний досвід, зокрема впрова-

дження європейських стандартів у рамках Водної рамкової директиви ЄС, може бути адаптований до українських умов. Розширення громадського контролю шляхом навчання місцевого населення сприятиме підвищенню точності та оперативності збирання даних. Модернізація лабораторій із залученням інвестицій забезпечить можливість аналізу нових параметрів, таких як мікропластик або специфічні забруднювачі. Крім того, розвиток екологічного законодавства шляхом посилення вимог до підприємств-експлуатантів сприятиме зменшенню обсягів забруднення:

1. *Впровадження автоматизованих систем моніторингу.*
2. *Залучення міжнародного досвіду.*
3. *Розширення громадського контролю.*
4. *Модернізація лабораторій.*
5. *Розвиток екологічного законодавства.*

### **Загрози**

На шляху впровадження моніторингових систем є й певні загрози. Зростання антропогенного навантаження через розширення кар'єрів може перевищити адаптаційний потенціал водних екосистем. Кліматичні зміни, такі як посухи чи інтенсивні зливи, можуть впливати на динаміку забруднення та ускладнювати точність оцінки результатів моніторингу. Економічна нестабільність і скорочення державного фінансування екологічних програм також є ризиками, які можуть відтермінувати модернізацію системи моніторингу. У разі недостатнього контролю з боку держави підприємства можуть ігнорувати екологічні нормативи, що посилить навантаження на водні об'єкти. Вторинне забруднення донних відкладень також є довгостроковою загрозою, яка потребує комплексного підходу для вирішення:

1. *Зростання антропогенного навантаження.*
2. *Кліматичні зміни.*
3. *Економічні виклики.*
4. *Недотримання екологічних норм підприємствами.*
5. *Вторинне забруднення.*

SWOT-аналіз демонструє, що впровадження моніторингових досліджень у районах видобування граніту має значний потенціал для покращення якості водних об'єктів, однак потребує

усунення слабких сторін та протидії зовнішнім загрозам. Впровадження автоматизованих систем, інтеграція даних, підвищення кваліфікації фахівців і активна участь громадськості є ключовими передумовами для створення ефективної системи моніторингу. А також впровадження пілотних проєктів за підтримки міжнародних організацій, спрямованих на захист водних ресурсів та збільшення частоти перевірок підприємств та введення штрафів за порушення екологічних норм, то завдяки цим заходам можна мінімізувати негативний вплив гірничодобувної діяльності та забезпечити сталі управління водними ресурсами.

SWOT-аналіз показує, що удосконалення моніторингових досліджень водних об'єктів у зонах видобування граніту має значний потенціал для зменшення негативного впливу на довкілля. Реалізація рекомендацій дозволить не лише підвищити ефективність моніторингу, але й сприяти.

Провівши PEST-аналіз (табл. 2), який дозволяє оцінити зовнішні чинники, які впливають на впровадження моніторингових досліджень водних об'єктів у зонах видобування граніту. Можемо стверджувати, що підхід розглядає політичні, економічні, соціальні та технологічні аспекти, що впливають на якість управління водними ресурсами та екологічну безпеку.

### **Політичні фактори (Political)**

Політична стабільність і наявність законодавчих норм є важливими передумовами для впровадження ефективного моніторингу. В Україні існує відповідна нормативна база, зокрема Водний кодекс України та закони, що регулюють охорону довкілля. Крім того, Україна поступово адаптує своє законодавство до європейських стандартів у межах Водної рамкової директиви ЄС, що сприяє впровадженню новітніх методів моніторингу. Однак політична воля до впровадження екологічних ініціатив часто стикається з іншими пріоритетами, зокрема підтримкою промислових підприємств. Недостатня частота екологічних перевірок і обмежена відповідальність гірничодобувних підприємств за порушення можуть стримувати впровадження моніторингових систем. З іншого боку, зростаючий інтерес держави до екологічної безпеки та міжнародна під-

Таблиця 2

**PEST-аналіз передумов впровадження моніторингових досліджень водних об'єктів  
з урахуванням видобування граніту**

<b>Political</b> – політичні показники	<b>Economical</b> – економічні показники
<p>A1. Наявність нормативної бази (Водний кодекс України, закони про охорону довкілля).</p> <p>A2. Адаптація до стандартів ЄС (Рамкова водна директива).</p> <p>A3. Недостатня частота екологічних перевірок.</p> <p>A4. Обмежена відповідальність підприємств за порушення.</p> <p>A5. Міжнародна підтримка екологічних проєктів (гранти, програми).</p>	<p>V1. Високі витрати на впровадження моніторингових систем.</p> <p>V2. Обмежене державне фінансування екологічних програм.</p> <p>V3. Недостатнє залучення гірничодобувних підприємств до фінансування природоохоронних заходів.</p> <p>V4. Можливості залучення міжнародних інвестицій.</p> <p>V5. Залежність економічного розвитку регіонів від якісного водопостачання.</p>
<b>Social</b> – соціальні показники	<b>Technological</b> – технологічні показники
<p>S1. Зростання занепокоєння населення щодо якості води.</p> <p>S2. Активна участь громадських організацій у моніторингових програмах.</p> <p>S3. Брак екологічної обізнаності у частини населення.</p> <p>S4. Вплив якості води на здоров'я та рівень життя місцевих громад.</p> <p>S5. Освітні ініціативи для підвищення екологічної свідомості.</p>	<p>D1. Сучасні технології моніторингу (автоматизовані системи, дрони, ГІС).</p> <p>D2. Доступність сертифікованих лабораторій для аналізу води.</p> <p>D3. Висока вартість впровадження новітніх технологій.</p> <p>D4. Можливість цифровізації даних та створення інтегрованих баз.</p> <p>D5. Недостатнє використання інновацій у менш розвинених регіонах.</p>

тримка (гранти, проєкти) створюють передумови для покращення моніторингу (табл.2).

### **Економічні фактори (Economic)**

Фінансування є ключовим фактором для впровадження моніторингових систем. Високі витрати на обладнання, аналізи та кваліфікованих спеціалістів є серйозним бар'єром. Для багатьох регіонів, де здійснюється видобування граніту, економічна ситуація обмежує можливості виділення коштів на екологічні проєкти. Гірничодобувні підприємства, хоча й отримують значний прибуток, не завжди спрямовують його на зменшення впливу своєї діяльності на довкілля. Водночас міжнародні інвестиції у проєкти зі сталого управління природними ресурсами можуть стати значним джерелом фінансування для впровадження сучасних моніторингових технологій. Наприклад, залучення коштів ЄС для впровадження автоматизованих систем моніторингу

дозволить значно покращити якість управління водними ресурсами. Економічний розвиток регіонів залежить від якісного водопостачання, тому екологічний моніторинг також має важливе значення для забезпечення сталого розвитку промисловості та сільського господарства.

### **Соціальні фактори (Social)**

У громадах, що знаходяться поруч із кар'єрами, якість води безпосередньо впливає на здоров'я населення, рівень життя та доступність природних ресурсів. Зростаюче занепокоєння громад щодо стану довкілля є важливим соціальним чинником для впровадження моніторингових систем. Громадські організації та місцеві активісти дедалі частіше стають ініціаторами екологічних досліджень та вимагають прозорості діяльності гірничодобувних підприємств. Участь громадськості в моніторингових програмах не лише сприяє прозорості, але й забезпечує

оперативне виявлення проблем. Однак брак обізнаності та доступу до якісної екологічної інформації у деяких громадах може ускладнювати цей процес. Освітні ініціативи, спрямовані на підвищення екологічної свідомості, можуть сприяти активнішому залученню населення до моніторингових програм і підтримувати сталість природних ресурсів.

### Технологічні фактори (Technological)

Сучасні технології відіграють важливу роль у вдосконаленні моніторингових досліджень водних об'єктів. В Україні доступні технології, що дозволяють проводити детальний аналіз проб води, але їхня доступність обмежена через високу вартість. Автоматизовані системи моніторингу, які вимірюють фізико-хімічні параметри води в реальному часі (наприклад, рівень рН, концентрацію важких металів, температуру), є перспективними, але поки що не широко впроваджені. Використання дронів і геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє ефективно контролювати екологічний стан великих територій, включно з прилеглими до кар'єрів водними об'єктами. Важливою частиною є цифровізація даних і створення інтегрованих баз, що дозволяє аналізувати результати досліджень у динаміці та формувати прогнози. Технологічний прогрес також сприяє зменшенню витрат на моніторинг, роблячи такі програми більш доступними. Проте, недостатнє фінансування та слабкий доступ до передових технологій у менш розвинених регіонах залишаються суттєвими викликами.

### Висновок

Ця схема відображає ключові політичні, економічні, соціальні та технологічні чинники, що впливають на впровадження моніторингових досліджень водних об'єктів. PEST-аналіз демонструє, що впровадження моніторингових досліджень водних об'єктів у зонах видобування граніту залежить від комплексного впливу політичних, економічних, соціальних і технологічних факторів. Основними викликами є недостатнє фінансування, обмежений доступ до сучасних

технологій і нерегулярність контролю. Водночас можливості, пов'язані з адаптацією європейських стандартів, залученням міжнародного фінансування та активізацією громадськості, створюють передумови для успішного впровадження моніторингових систем. Інтеграція сучасних технологій, розширення громадського контролю та підвищення екологічної свідомості населення є ключовими факторами для забезпечення екологічної стійкості в районах видобування граніту.

Стратегічний аналіз передумов впровадження моніторингових досліджень водних об'єктів із урахуванням видобування граніту демонструє багатогранність цього завдання. З екологічної точки зору, моніторинг є інструментом захисту водних екосистем. З технологічної – забезпечує високоточний контроль. З економічної – сприяє зменшенню витрат і ризиків. Із соціальної – забезпечує прозорість і підвищує довіру громад. А з правової – відповідає сучасним вимогам національного та міжнародного законодавства. Урахування цих передумов дозволить створити ефективну систему моніторингу, яка стане основою для екологічно відповідального управління природними ресурсами.

### Список використаних джерел

1. Єльнікова Т. О., Коцюба І. Г., Герасимчук О. Л., Скиба Г. В. Дослідження екологічного стану річки Ірша. Водні біоресурси та аквакультура. Херсон. 2021. Вип. 1 (9). С. 18-26. Режим доступу: [http://wra-journal.ksauniv.ks.ua/archives/2021/1\\_2021/4.pdf](http://wra-journal.ksauniv.ks.ua/archives/2021/1_2021/4.pdf).
2. Корніюк А. В., Пацева І. Г. Цифровий моніторинг якості води, виклики та рішення. Екологічні науки. 2023. Вип. 4 (49). С. 32-37. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.4>.
3. Пацева І.В., Кагукіна А.М. Адаптація до зміни клімату міста Житомир. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. Вип. 3. С. 66-72.
4. Nyambura, C., Hasim, N. O., Chege, M. W., Tokonami, S., & Omonya, F.W. (2020). Cancer and non-cancer health risks from carcinogenic heavy metal exposures in underground water from Kilimambogo, Kenya. *Groundw. Sustain. Dev.*, 10, 100315.
5. Verkhovna Rada of Ukraine (2010). On

approval of the State Sanitary Rules and Regulations «Hygienic Requirements to Drinking Water Intended for Human Consumption» (DSanPiN 2.2.4-171-10). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>.

6. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Пацева І.Г. Прояв зміни температури повітря на території м. Житомир. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Серія «Екологія». 2023. Вип. 29. С.6–16.

7. Демчук Л.І., Пацева І.Г. Організація моніторингу та прогнозування кризових ситуацій. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Серія «Екологія». 2023. Вип. 29. С.57–63.

8. Qasemi, M., Farhang, M., Biglari H. et al. (2018). Health risk assessments due to nitrate levels in drinking water in villages of Azadshahr, northeastern Iran. *Environ Earth Sci*, 77, 782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7973-6>.

9. Yu, G., Wang, J., Liu, L. et al. (2020). The

analysis of groundwater nitrate pollution and health risk assessment in rural areas of Yantai, China. *BMC Public Health*, 20, 437. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12889-020-08583-y>.

10. Moldovan, A., Hoaghia, M. A., Kovacs, E. et al. (2020). Quality and Health Risk Assessment Associated with Water Consumption – A Case Study on Karstic Springs. *Water*, 12, 3510. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12123510>.

11. Richards, J, Chambers, T, Hales, S, Joy, M, Radu, T, Woodward, A, Humphrey, A, Randal, E, & Baker, MG. (2022). Nitrate contamination in drinking water and colorectal cancer: Exposure assessment and estimated health burden in New Zealand. *Environ Res*, 112322. DOI: 10.1016/j.envres.2021.

12. Wheeler, D.C., Nolan, B.T., Flory, A.R. et al. (2015). Modeling groundwater nitrate concentrations in private wells in Iowa. *The Science of the total environment*. 2015, 536, 481–488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.080>.

## ПОНЯТІЙНИЙ АПАРАТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОГЕННЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Машков О. А., Печений В. Л., Присяжний В. І., Оводенко Т. С.  
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35м. Київ, 03035  
*mashkov\_oleg\_52@ukr.net*

Досліджується можливість кількісної оцінки функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. Вводяться поняття ознаки, критерію і запасу функціональної стійкості, які ґрунтуються на визначенні параметрів графа, що описує структуру досліджуваної системи такого класу. У статті запропоновано ознаки і показники функціональної стійкості структури екологічного комплексу. Обґрунтовано критерії та показники функціональної стійкості об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів. Розглянуто поняття запасу функціональної стійкості. Введені поняття дозволяють оцінити як далеко стан екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) перебуває від границі стійкості, тобто який є запас її функціональної стійкості. Цей запас можна визначити також у сенсі зв'язності структури. У такому разі він буде характеризуватися кількістю відмов (розривом ребер чи виходом з ладу вершин), що можуть спричинити перехід структури комплексу до нестійкого стану. Розроблено методи кількісного оцінювання функціональної стійкості з використанням введених показників. Перевагами такого підходу є можливість кількісного оцінювання функціональної стійкості поточної структури екологічного комплексу, виходячи з зовнішніх ознак. На основі таких оцінок можна давати рекомендації щодо нарощування структури чи складати обґрунтовані вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи

підтримки прийняття управлінських екологічних рішень. Проведені дослідження дають змогу ще на етапі проектування обґрунтовувати вимоги до системи управління екологічною безпекою об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів, розв'язувати задачі синтезу оптимальної структури екологічного екомплексу за критерієм максимуму функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови та експлуатації ліній зв'язку, а також обґрунтовувати доцільність нарощування структури системи в процесі експлуатації.

**Ключові слова:** екологічний комплекс, запас функціональної стійкості, критерій і запас функціональної стійкості, об'єкти критичної інфраструктури, система підтримки прийняття управлінських екологічних рішень, система управління екологічною безпекою, техногенно небезпечні об'єкти, функціональна стійкість.

**Conceptual apparatus of functional stability of critical infrastructure objects and technogenic hazardous objects.** *Mashkov O. A. Pechenyi V. L. Prysiazhnyi V. I. Ovodenko T.*

The possibility of quantitative assessment of the functional stability of distributed information and control systems is investigated. The concepts of a feature, criterion and margin of functional stability are introduced, which are based on determining the parameters of the graph describing the structure of the studied system of this class. The article proposes features and indicators of the functional stability of

the structure of the ecological complex. The criteria and indicators of the functional stability of critical infrastructure objects and technogenically hazardous objects are substantiated. The concept of the margin of functional stability is considered. The introduced concepts allow us to assess how far the state of the ecological complex (critical infrastructure objects and technogenically hazardous objects) is from the stability limit, that is, what is the margin of its functional stability. This margin can also be defined in terms of the connectivity of the structure. In this case, it will be characterized by the number of failures (breakage of edges or failure of vertices), which can cause the transition of the structure of the complex to an unstable state. Methods for quantitative assessment of functional stability using the introduced indicators have been developed. The advantages of this approach are the possibility of quantitative assessment of the functional stability of the current structure of the ecological complex, based on external signs. Based on such assessments, it is possible to give recommendations for building up the structure or to formulate justified requirements for the environmental safety management system and the system for supporting the adoption of managerial environmental decisions. The conducted studies make it possible to substantiate the requirements for the environmental safety management system of critical infrastructure facilities and technogenically hazardous facilities at the design stage, to solve the problems of synthesizing the optimal structure of the ecological ecomplex according to the criterion of maximum functional stability with a restriction on the cost of construction and operation of communication lines, and also to justify the feasibility of building up the structure of the system during operation.

**Keywords:** ecological complex, functional stability reserve, criterion and functional stability reserve, critical infrastructure facilities, environmental management decision-making support system, environmental safety management system, technogenically hazardous facilities, functional stability.

### Постановка проблеми

Проблемна ситуація, що призвела до виникнення наукового напрямку забезпечення функціональної стійкості, пов'язана з розробленням

наприкінці ХХ століття складних автономних техногенних систем, що функціонують в екстремальних умовах (техногенне небезпечні об'єкти, об'єкти критичної інфраструктури). Їхня висока вартість та потенційна небезпека зажадали забезпечення відповідного рівня надійності та безпеки застосування. При цьому традиційні методи, що ґрунтуються на багаторазовому резервуванні, введенні систем вбудованого контролю та елементів з підвищеним рівнем надійності, погіршували техніко-економічні характеристики проєктованих систем, не завжди призводять до необхідного зменшення ймовірності виникнення небезпечних ситуацій. Необхідність запровадження додаткової апаратної надмірності задля забезпечення надійності системи стало важливим обмеженням цього підходу. Тому було запропоновано розглядати позаштатні стани системи, викликані відмовами, як допустимі, і їм формувати адекватне (функціонально стійке) управління, спрямоване на парирування наслідків відмов та підтримку виконання функцій системи. За рахунок цього управління забезпечується перерозподіл ресурсів системи задля досягнення головної мети, навіть за умов відмов. Вперше поняття «функціональна стійкість», його визначення та принципові засади забезпечення функціональної стійкості були наведені у публікаціях, присвячених вирішенню конкретних завдань управління складними автономними динамічними об'єктами [1–3]. Було встановлено, що важливою умовою забезпечення цієї якості є можливість перерозподілу наявних ресурсів усередині системи (комплексу).

Проблема аналітичного оцінювання функціональної стійкості екологічної системи виникає при вирішенні завдання забезпечення екологічної безпеки регіонів та об'єктів критичної інфраструктури. При цьому об'єктом дослідження є об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти. Сукупність цих об'єктів пропонується розглядати як розподілені інформаційно-керуючі системи (РІКС), які містять розподілені у просторі за територіальною ознакою засоби автоматизованої оброблення інформації для розв'язування задач накопичування, оброблення, зберігання та передачі інформації та енергії. Такі системи належать до класу складних організаційних систем і побудовані на основі

технології корпоративних обчислювальних мереж прийняття управлінських екологічних рішень. Вона складається з вузлів комутації і каналів (ліній) зв'язку між окремими елементами системи. Головною вимогою, що висувається до РІКС, є виконання основної функції – забезпечення абонентів корпоративної мережі потенційною можливістю доступу до розподілених інформаційних та енергетичних ресурсів, об'єднаних у єдиний комплекс.

Всі інші вимоги, наприклад – ефективність, продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, живучість, розширюваність і обсяг структури – залежать від якості виконання цієї основної задачі [4]. У сучасних умовах на РІКС негативно впливають внутрішні (відмови, перебої, помилки персоналу та працівників) і зовнішні (активний або пасивний вплив зовнішнього середовища) чинники. Тому проблема забезпечення можливості безпечного (безпомилкового функціонування РІКС), за умови можливої дії негативних чинників, є актуальною і досі аналітично не сформульована.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз досліджень і публікацій щодо забезпечення стійкості функціонування складних систем. Вирішенню проблеми забезпечення стійкості функціонування складних технічних систем присвячено низку наукових праць [1–4]. Однак, на наш погляд, основна увага в них зосереджена на розв'язанні часткових задач, а саме – побутових резервованих інформаційно–керуючих систем, відмовостійких керуючих обчислювальних систем, адаптивних систем управління.

У роботі [3] уперше введено, а в [6, 7] розкрито поняття функціональної стійкості складних динамічних об'єктів, що описуються системою диференціальних рівнянь. Запропонований підхід базується на принципах комплексного забезпечення спостережуваності, керованості, ідентифікованості динамічних об'єктів. Однак для РІКС такий апарат неприйнятний. У теорії надійності визначення показників надійності опирається, насамперед, на приведенні структури системи до відповідної схеми у вигляді послідовних і паралельних з'єднань модифікованих елемен-

тів. Такий підхід також не можна застосовувати для складних організаційних систем із великою кількістю перехресних (постійних і випадкових) зв'язків і врахуванням взаємовпливу одних елементів на інші, тобто до систем із випадковими структурою та зв'язками [5].

**Метою** цієї роботи є виклад запропонованого авторами математичного апарату кількісної оцінки функціональної стійкості динамічно змінюваних структур об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів.

### Результати досліджень

У традиційних системах автоматичного управління автономними об'єктами, розділених на окремі канали у складі датчиків, обчислювачів та виконавчих механізмів, ресурси (енергетичні, обчислювальні, інформаційні), що виділяються на керування, жорстко закріплені між відповідними каналами. У цьому неможливість перерозподілу ресурсів між каналами обмежує можливість формування функціонально стійкого управління.

Технологічною основою забезпечення функціональної стійкості стало створення бортових інформаційно–керівних комплексів, які дозволили комплексувати ресурси системи та здійснювати їх перерозподіл.

Тільки комплексування всіх каналів систем автоматичного управління в єдиний інформаційно–керуючий комплекс, де інформаційно–вимірювальна підсистема включатиме всі джерела інформації, пристрої перекодування та сполучення, обчислювальна система – усі обчислювачі, а енергетична підсистема – усі виконавчі механізми та джерела енергії дозволить забезпечити її функціональну стійкість.

Слід враховувати, що можливість комплексного використання ресурсів та забезпечення функціональної стійкості систем обмежується умовами стійкості динамічної системи, її керованості та спостережуваності за Калманом.

Натепер досить повне дослідження умов забезпечення функціональної стійкості проведено лише для лінійних нестационарних стаціонарних моделей динамічних систем.

## Критерії та показники функціональної стійкості об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів

Під функціональною стійкістю будемо розуміти здатність об'єктів виконувати свої функції упродовж заданого інтервалу часу за умови низки експлуатаційних відмов, навмисних ушкоджень, втручання в обмін і оброблення інформації та енергії, а також у разі помилок обслуговуючого персоналу [5, 7].

Функціональна стійкість складного екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) поєднує властивості надійності, відмовостійкості, живучості і характеризує здатність екологічного комплексу до відновлення працездатного стану коштом використання надмірності ресурсів.

*Математична модель* структури екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) має вигляд неорієнтованого графа  $G(V, E)$ ,  $v_i \in V$ ,  $e_{ij} \in E$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ , який описується матрицею суміжності

$$A = \|a_{ij}\|, i, j = 1, \dots, n, a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{при } e_{ij} \notin E. \end{cases} \quad (1)$$

Множині вершин  $V$  відповідає множина вузлів комутації розмірності  $n$ , а множині ребер  $E$  – множина ліній зв'язку між вузлами комутації. Приймаємо, що РІКС буде виконувати основну функцію – обмін даними, якщо між будь-якою парою вузлів комутації існує хоча б один маршрут передачі інформації. Так, вимога зв'язності графа дає підставу кількісно оцінити функціональну стійкість розподілених інформаційно-керуючих систем. У цій роботі не розглядається якість виконання основних функцій, яка описується часом затримки повідомлення при пересиланні. Також вважається, що канали зв'язку мають пропускну здатність, яка дозволяє передати доволі великий інформаційний потік.

У технічній кібернетиці, а саме в теорії автоматичного керування, побудовано класичну теорію стійкості динамічних систем, засновником якої є Ляпунов А. М.. У згаданій теорії можна оцінити стійкість, не розв'язуючи систему диференціальних рівнянь, що описують об'єкт, а використовуючи прості ознаки, умови і критерії стійкості, розроблені Вишеградським І., Гурвицем

А., Михайловим А., Найквістом Х., та інші. [3]. За аналогією з класичною теорією стійкості, пропонується оцінювати функціональну стійкість за параметрами графа, що описує структуру екологічного комплексу. На основі зовнішнього вигляду графа і його параметрів можна визначити, чи буде система функціонально стійкою, нестійкою або нейтральною.

*Ознака функціональної стійкості структури екологічного комплексу.* Структура екологічного комплексу є функціонально стійкою, якщо граф структури є однокомпонентним та не має мостів і вузлів з'єднання. Зворотне визначення дозволяє окреслити функціональну нестійкість структури.

*Ознака функціональної нестійкості структури.* Структура екологічного комплексу є функціонально нестійкою, якщо її граф є багатокомпонентним і незв'язаним.

Відтак, на основі аналізу зовнішнього вигляду графа, а саме за кількістю компонент, наявністю мостів і вузлів з'єднання графа, можна зробити висновок щодо функціональної стійкості структури, тобто закладеної в ній здатності уникати відмов й ушкоджень. Однак для сильно розгалужених і багатoverшинних графів провести оцінку на основі зовнішнього вигляду складно. Тому для кількісної оцінки ступеня функціональної стійкості введено в розгляд *показники функціональної стійкості структури екологічного комплексу:*

1. *Показник вершинної зв'язності  $\chi(G)$*  – це найменша кількість вершин, видалення яких разом з інцидентними їм ребрами призводить до незв'язного чи одновершинного графа.

2. *Показник реберної зв'язності  $\lambda(G)$*  – це найменша кількість ребер, видалення яких призводить до незв'язного графа.

3. *Імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$*  – це імовірність того, що повідомлення з вузла  $i$  у вузол  $j$  буде передано за час не більший  $t$ .

Аналіз цих показників дозволяє виділити такі їх особливості:

– вершинна і реберна зв'язності характеризують тільки поточну структуру, незалежно від надійності вузлів комутації чи ліній зв'язку;

– показники  $\chi(G)$  і  $\lambda(G)$  набувають цілих значень і пов'язані співвідношенням

$$\chi(G) \leq \lambda(G) \leq \min_{v_i \in V} \{\deg(v_i)\}; \quad (2)$$

– імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$  дозволяє враховувати надійність комутаційного обладнання, тип фізичного каналу передачі інформації, наявність резервних каналів і маршрутів, а також зв'язність розподіленої структури. Разом з тим, обчислення значень  $P_{ij}(t)$  є складною і громіздкою задачею;

– імовірність зв'язності характеризує зв'язність тільки однієї пари вершин. Для того, щоб охарактеризувати зв'язність усіх пар вершин необхідно оперувати з матрицею ймовірностей зв'язності  $P = \|P_{ij}\|$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ .

На основі запропонованих ознак і показників можна розробити критерії функціональної стійкості структури екологічного комплексу:

**1. Структурний критерій.** Структура екологічного комплексу буде функціонально стійкою, якщо значення вершинної і реберної зв'язностей справджують умову

$$\chi(G) \geq 2 \cup \lambda(G) \geq 2. \quad (3)$$

**2. Імовірнісний критерій.** Структура екологічного комплексу буде функціонально стійкою, якщо ймовірність зв'язності кожної пари вершин буде не менша від заданої

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^c, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

де  $n$  – кількість вершин графа  $G(V, E)$ .

Сформульовані критерії дозволяють на основі точних розрахунків визначити функціональну стійкість поточної структури екологічного комплексу.

Границя й області функціональної стійкості розподілених інформаційно–керуючих систем.

На границі областей стійкості і нестійкості існує специфічна область, у якій система не є функціонально стійкою і, водночас, не є функціонально нестійкою. Таку область, за аналогією з теорією стійкості динамічних систем [3], називається границею функціональної стійкості структури.

**Ознака границі функціональної стійкості.** Поточна структура перебуває на границі функціональної стійкості, якщо граф структури зв'язний, має у своєму складі мости ( $N_E \geq 1$ ) чи вузли з'єднання ( $N_V \geq 1$ )

$$\{K = 1\} \wedge [\{N_V \geq 1\} \vee \{N_E \geq 1\}], \quad (5)$$

де  $K$  – кількість компонент графа, а умова  $K = 1$  означає, що граф зв'язний,  $N_V$  ( $N_E$ ) – кількість вузлів з'єднання (мостів) графа.

Мостом називається ребро зв'язного графа, що з'єднує два підграфи, після видалення якого граф перетворюється з однокомпонентного у двокомпонентний. У деяких роботах з теорії графів мост називають перешийком.

Вузлом з'єднання називається така вершина зв'язного графа, після видалення якої разом з інцидентними їй ребрами граф перетворюється з однокомпонентного у двокомпонентний [3].

Наявність у структурі моста чи вузла, що з'єднують два підграфи, означає, що всі маршрути передачі інформації з вершин одного підграфа у вершини іншого містять цей мост чи вузол з'єднання. Це істотно знижує структурну надійність і функціональну стійкість РІКС.

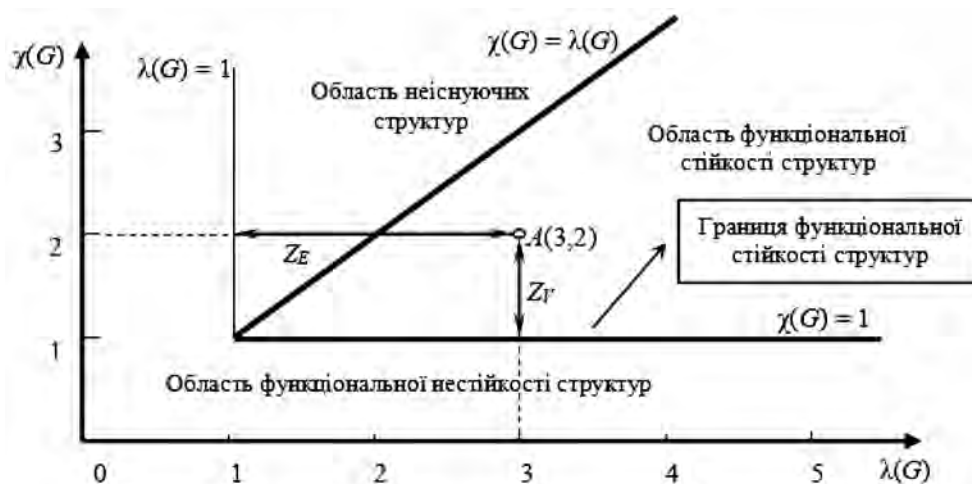


Рис. 1. Геометрична інтерпретація областей функціональної стійкості і нестійкості

Тому для забезпечення функціонально стійкого стану системи, для уникнення мостів чи вузлів з'єднання, доцільно вводити в її структуру резервні лінії зв'язку. При цьому виникає декілька незалежних і альтернативних маршрутів передачі інформації.

Аналіз структур показує, що за перебування системи на границі стійкості, вона є працездатною і виконує необхідний обсяг функцій. Однак, у разі відмови хоча б одного моста чи вузла з'єднання, система переходить у нестійкий стан.

Області функціональної стійкості і нестійкості можна зобразити в декартовому просторі в координатах  $\lambda(G), \chi(G)$  (рис. 1). Точка на площині, що характеризує стан системи, визначається значеннями параметрів  $\lambda(G), \chi(G)$  графа структури. За належністю точки тій чи іншій області можна оцінювати функціональну стійкість чи нестійкість системи.

У графічному представленні границею функціональної стійкості екологічного комплексу буде геометричне місце точок, що лежать на двох прямих  $\chi(G) = 1$  та  $\lambda(G) = \chi(G)$  (рис. 1).

### Запас функціональної стійкості екологічного комплексу

Введені поняття дозволяють оцінити як далеко стан екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенне небезпечні об'єкти) перебуває від границі стійкості, тобто який запас її функціональної стійкості. Цей запас можна визначити також у сенсі зв'язності структури. У такому разі він буде характеризуватися кількістю відмов (розривом ребер чи виходом з ладу вершин), що можуть спричинити перехід структури комплексу до нестійкого стану.

Запас функціональної стійкості екологічного комплексу кількісно можна визначити з використанням наступних показників:

1. *Реберний запас стійкості* – значення  $Z_E$ , яке дорівнює відстані від точки з координатами  $(\chi(G), \lambda(G))$  в області функціональної стійкості до прямої  $\lambda(G)=1$

$$Z_L = \lambda(G) - 1, \quad (6)$$

2. *Вершинний запас стійкості* – значення  $Z_V$ , яке дорівнює відстані від точки з координатами

$(\chi(G), \lambda(G))$  в області функціональної стійкості до прямої  $\chi(G) = 1$

$$Z_V = \chi(G) - 1. \quad (7)$$

Можна також обчислювати запас функціональної стійкості, як різницю між поточним  $P_{ij}$  і заданим  $P_{ij}^c$  значеннями ймовірності зв'язності. Очевидно, що в цьому випадку запас буде визначатися квадратною матрицею

$$Z_P = \left\| z_{ij} \right\|, \quad z_{ij} = P_{ij} - P_{ij}^c. \quad (8)$$

У такий спосіб, після знаходження запропонованих параметрів з використанням ознак функціональної стійкості, можна визначити чи перебуває екологічний комплекс у функціонально стійкому чи нестійкому станах. Запас функціональної стійкості, який визначає ступінь цієї стійкості, можна знайти як аналітично на основі запропонованих формул, так і графічно (див. рис. 1). Проведені дослідження дають змогу ще на етапі проектування обґрунтовувати вимоги до системи управління екологічною безпекою об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів, розв'язувати задачі синтезу оптимальної структури екологічного комплексу за критерієм максимуму функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови та експлуатації ліній зв'язку, а також обґрунтовувати доцільність нарощування структури системи в процесі експлуатації.

### Висновки

У статті запропоновано ознаки і показники функціональної стійкості структури екологічного комплексу. Уперше введено поняття границі і запасу функціональної стійкості екологічного комплексу. Розроблено методи кількісного оцінювання функціональної стійкості з використанням введених показників. Перевагами такого підходу є можливість кількісного оцінювання функціональної стійкості поточної структури РІКС, виходячи з простих зовнішніх ознак. На основі таких оцінок можна давати рекомендації щодо нарощування структури чи складати обґрунтовані вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи підтримки прийняття управлінських екологічних рішень.

### Список використаних джерел

1. Nils J. Nilsson . The Quest for Artificial Intelligence. – 1. – Cambridge University Press, 2019. – 578 с. – ISBN 978–0521116398 .
2. Stuart J. Russell, Peter Norvig . Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 3. – Pearson, 2015. – ISBN 978–9332543515.
3. Барабаш О. В., Козелков С. В., Машков О. А. Понятійний апарат функціональної стійкості розподілених інформаційно–керуючих систем // Збірник наукових праць НЦ ВПС ЗС України.– Вип.№7, 2005. – С. 87 – 95.
4. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Оводенко Т. С., Печений В. Л. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень в галузі екологічної безпеки / Екологічні науки: науково–практичний журнал. К.: ДЕА, – Випуск 4(49), 2023, с. 144–152.
5. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у галузі екологічної безпеки. Бондар О. І., Машков О.А., Присяжний В.І., Оводенко Т.С., Печений В.Л. / Екологічні науки: науково–практичний журнал. К.: ДЕА, – Випуск 3(48), 2023,с.7–16.
6. Машков О. А., Машков В. А. Забезпечення відмовостійкості складних систем на основі їх самодіагностування за принципом блукаючого ядра // Кібернетика та обчислювальна техніка, 1998.– вип. 116.– С. 103–111.
7. Машков О. А., Машков В. А. Принципи функціональної стійкості складних систем // Наука і оборона, 1995.– №2.– С. 37–44.

УДК 502.51:574.5/6

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-09>

## ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ВОДНОЇ ЕКОСИСТЕМИ В НИЖНІЙ ЧАСТИНІ РІЧКИ ДНІПРО В СУЧАСНИХ УМОВАХ

<sup>1</sup>Улицький О. А., <sup>2</sup>Д'яченко Н. О., <sup>3</sup>Пашкевич Л. П., <sup>4</sup>Головач А. Г.<sup>1</sup>ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»  
пр. Академіка Палладіна, 34а, м. Київ, 03142<sup>2</sup>ДУ «Науковий центр гірничої геології, геоecології та розвитку інфраструктури НАН України»,  
б-р Вернадського, 34б, м. Київ, 03142<sup>3</sup>Вінницький національний технічний університет,  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21000<sup>4</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035

olegulytsky@gmail.com,

natalidyachenko1969@gmail.com,

leonid@ukr.ua

garden129@ukr.net

У роботі представлені результати аналізу стійкості водної екосистеми в ландшафтних районах Каховського водосховища (КВ) та нижньої течії річки Дніпро в умовах руйнування КВ з метою оцінки здатності природної водної екосистеми нижнього Дніпра до самовідновлення після антропогенного тиску.

Запропоновано авторами сучасний новітній підхід – оцінка стійкості екосистеми води річки Дніпро за допомогою метода комплексних індексів: евтрофікації (EI), якості води (WQI) та самоочищення (IS) та розрахунку показника екологічного резерву. Здійснення оцінки стійкості водної екосистеми нижнього Дніпра в сучасних умовах проведено з використанням даних моніторингу Державного агентства водних ресурсів України по постах на річці Дніпро в Запорізькій та Херсонській областях та річці Інгулець

Встановлено, що оцінка стійкості екосистеми нижнього Дніпра є складною багатофакторною задачею. Вона вимагає комплексного підходу, враховуючи різноманітні показники: гідрологічні, якості води, біорізноманіття та антропогенного впливу. За результатами проведеної оцінки стійкості екосистеми нижнього Дніпра, виявлено, що здатність до самоочищення річки Дніпро

демонструє стійкість, але з певними коливаннями: розрахунок індексу самоочищення показав, що річка має досить високу здатність до самоочищення, але її показники залежать від сезону та кількості опадів. Розрахунок індексу евтрофікації вказує на помірний рівень евтрофікації, тобто на відносну стійкість екосистеми. Вплив фосфатів на евтрофікацію виявився слабкішим, ніж нітратів. Значення WQI біля Запоріжжя вказує на середню якість води та свідчить про задовільний її стан, але потребує постійного контролю. Отримані значення індексів та їх інтерпретацію слід розглядати як частину комплексної оцінки, а не як визначальний фактор.

**Ключові слова:** стійкість екосистеми, індекс самоочищення, Каховське водосховище, кореляція, екологічна безпека, рівень евтрофікація.

**Assessment of the sustainability of the aquatic ecosystem in the lower part of the dnipro river in modern conditions.** Ulytskyi O. Dyachenko N. Pashkevych D. Holovach A.

The paper presents the findings of an analysis of the aquatic ecosystem sustainability in the landscape areas of the Kakhovka Reservoir (KR) and the lower reaches of the Dnipro River in the context of the KR

destruction, with the aim of assessing the ability of the natural aquatic ecosystem of the lower Dnipro to recover from anthropogenic pressure.

A contemporary and pioneering approach is put forward: the assessment of the sustainability of the Dnipro river water ecosystem employing the method of complex indices (i.e. eutrophication (EI), water quality (WQI) and self-purification (IS)) and the calculation of the ecological reserve indicator. The assessment of the sustainability of the aquatic ecosystem of the lower Dnipro River in modern conditions was carried out using the monitoring data of the State Agency of Water Resources of Ukraine at the gauging stations on the Dnipro River in the Zaporizhzhia and Kherson regions and the Ingulets River.

The assessment of the sustainability of the Lower Dnipro ecosystem has been determined to be a complex multifactorial task. An integrated approach, encompassing hydrological, water quality, biodiversity and anthropogenic impact indicators, is imperative for its effective evaluation. The assessment of the Lower Dnipro ecosystem's sustainability revealed that the Dnipro River's self-purification capacity demonstrates stability, albeit with certain fluctuations. The calculation of the self-purification index demonstrated that the river has a fairly high self-purification capacity, yet its performance is contingent on the season and rainfall. The calculation of the eutrophication index indicates a moderate level of eutrophication, i.e. the relative stability of the ecosystem. The impact of phosphates on eutrophication was weaker than that of nitrates. The WQI value near Zaporizhzhia indicates an average water quality and indicates a satisfactory condition, but requires constant monitoring. The obtained values of the indices and their interpretation should be considered as part of a comprehensive assessment, not as a determining factor.

**Keywords:** ecosystem sustainability, self-purification index, Kakhovka reservoir, correlation, environmental safety, eutrophication level.

### Постановка проблеми

Масштабні військові дії 2022-2025 роках про-України, нажаль, призвели до руйнування Каховського водосховища, що за думкою експертів,

мало катастрофічні наслідки. Підрив дамби призвів до різкого падіння рівня води у Каховському водосховищі, що викликало: а) екологічну катастрофу затоплення значних територій нижче за течією Дніпра, загибель риби та інших водних організмів, забруднення води та ґрунтів. Це створило загрозу для екосистеми регіону на тривалий час, наслідки якої будуть відчуватися протягом багатьох років. Загальний масштаб катастрофи ще повністю не оцінений.

Виходячи з трактування терміну «екологічна безпека» як рівня захищеності життєво важливих інтересів людини, а також суспільства, довкілля від реальних або потенційних загроз, руйнування Каховської ГЕС стало однією з найбільших екологічних та гуманітарних катастроф в історії України. Саме тому, актуальність вивчення екологічних умов стійкості водної екосистеми нижньої течії Дніпра після руйнування Каховської ГЕС надзвичайно висока з кількох причин:

*По-перше*, це масштаб катастрофи. Руйнування дамби мало безпрецедентні наслідки для річкової екосистеми. Раптове вивільнення великого об'єму води, зміна гідрологічного режиму, забруднення води та ґрунту створили унікальну ситуацію, що потребує ретельного вивчення.

*По-друге*, це довготривалі наслідки. Вплив катастрофи можливо буде відчуватися протягом багатьох років. Вивчення динаміки відновлення екосистеми та тривалості процесу відновлення є критично важливим для прогнозування майбутнього стану річки Дніпро та інших водотоків. З цього випливає окрема позиція актуальності – це питання водопостачання та безпеки. Зміна екологічного стану р. Дніпро безпосередньо впливає на якість води, що використовується для споживання та інших побутових потреб населення. Дослідження допоможе в розробленні майбутніх ефективних заходів для забезпечення водопостачання та безпеки населення.

Під загрозою опинилося сільське господарство (СГ). Зміна гідрологічного режиму та якості води може негативно впливати на СГ в регіонах де вона протікає. Дослідження допоможе розробці стратегій адаптації його до нових умов. І наостанок, результати досліджень будуть основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо екологічної безпеки екосистеми нижньої течії Дніпра.

## Аналіз останніх досліджень та публікацій

Стійкість природного середовища визначається як його властивість зберігати свою структуру і характер функціонування при зміні умов, викликаних зовнішнім впливом. За даними досліджень [1] поняття стійкості визначається низкою індексів, які характеризують різні показники. До таких показників належать сольовий, трофосапробіологічний склад і токсичність, екологічний резерв, ефективність механізму пластичного обміну хімічних сполук антропогенний вплив та екологічна ємність. Серед інших показників – асиміляційні потенціал та асиміляційна ємність, трофічний статус, коефіцієнт самооновлення води, порівняння показників з нормативними значеннями, рівні компенсаторного механізму біотичної саморегуляції води.

Загалом, стійкість екосистем є важливим індикатором стану довкілля. Загалом, це здатність екосистеми протистояти впливу зовнішніх факторів таким чином, щоб зберегти структурну цілісність та функціональні можливості. Вона може бути концептуалізована як внутрішня стабільність певного стану екосистеми, а також її здатність до переходу в будь-який інший стан у певний момент часу (статична стійкість) і безперервність розвитку екосистеми (динамічна стійкість). За даними [2], «принциповим у переході від розгляду технічної системи до розгляду екосистеми є те, що в останньої відхилення реальних траєкторій розвитку від траєкторії мети відбуваються випадково і отримати точну інформацію про ці відхилення неможливо. І якщо про стійкість технічної системи можна стверджувати однозначно, аналізуючи диференціальні рівняння, що характеризують поведінку системи, то здебільшого скласти диференціальні рівняння функціонування екосистеми неможливо. Тому висновки про стійкість або нестійкість екосистеми можна робити тільки з певною імовірністю». Автори наголошують, «що стійкість екосистем значною мірою визначається рівнем збалансованості розвитку її складових – екологічних підсистем». Тобто, стійкість водних екосистем можна розглядати як екологічну підсистему.

Здебільшого, потенціал стійкості природного середовища оцінюють за метеорологічним потенціалом атмосфери, потенціалами стійкості

поверхневих вод, ґрунтів та біотичним потенціалом [3]. На ділянці нижньої течії р. Дніпра в період існування водосховищ природний потенціал самоочищення поверхневих вод, згідно з дослідженнями авторів роботи [4] мав досить високий (від 0,5 до 2) інтегральний показник.

Автори дослідження [5] вивчали питання: «який фактор рухає еволюцією екосистеми для відновлення». Для наукового розв'язання вчені висувають гіпотезу «екосистемного або ресурсного ядра», яке забезпечує основу (матерію та енергію) для існування та прогресу організмів і має бути ядром екосистеми. Дослідники стверджують, що введення штучної допоміжної енергії є прямою причиною еволюції екосистеми. При цьому, різні комбінації природної та набутої енергії об'єднуються для підтримання однієї й тієї самої екосистеми в різних умовах навколишнього середовища. Одна екосистема замінюється іншою екосистемою, що називається еволюцією. Сене наведеної теорії полягає в тезі: екосистема – угруповання живих організмів у поєднанні з неживими компонентами їхнього середовища [6]. При цьому, для існування та розвитку організмів необхідні абіотичні компоненти світло, вода, повітря, ґрунт тощо. Органічна частина відноситься до взаємовідносин між організмами (рослини, тварини, мікроби), які поділяються на виробників, споживачів і редуцентів. Ці біотичні та абіотичні компоненти пов'язані між собою за допомогою колообігу матерії та потоку енергії [7]. Тобто, середовище визначає існування організмів. Однак, коли організми адаптуються до середовища, вони починають чинити перетворювальний вплив на навколишнє середовище. Інакше кажучи, абіотичний компонент екосистеми (ресурси) виступає в ролі ядра екосистеми або ядра ресурсів і забезпечує енергію для розвитку живих істот. Тому, в еволюції екосистеми різні екологічні чинники призводять до зміни структури та функцій системи, а зміна матерії та енергії є основними рушійними факторами. В той же час, стійкість екосистем розглядається як здатність зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі за впливу змін умов зовнішнього середовища. Оскільки, зруйноване Каховське водосховище (в певний відрізок часу), являло собою водну екосистему, тому при розгляді питання стійкості необхідно розглядати

поняття та значення стійкості водних екосистем як підґрунтя у вигляді абіотичної компоненти.

З погляду на вище означені тези, стійкість водних екосистем є важливим аспектом не тільки екології, який стосується здатності цих систем підтримувати свою структуру, функції та біорізноманіття під впливом природних і антропогенних змін, але й екологічної безпеки. Тому, у сучасних умовах, зважаючи на глобальні зміни клімату, забруднення води та антропогенні втручання, розуміння механізмів стійкості водних екосистем набуває особливої актуальності.

Існує багато чинників, що впливають на стійкість водних екосистем:

- *біорізноманіття*: багате видове різноманіття підвищує стійкість системи, оскільки кожен вид виконує свої функції та може замінювати інші в умовах стресу.
- *гідрологічні умови*: стабільний гідрологічний режим (рівень води, температура та течія) є критичним для збереження екосистеми. Будь-які зміни можуть загрожувати стійкості.
- *забруднення*: викиди забруднюючих речовин можуть серйозно вплинути на якість води що, так само, може призвести до зниження біорізноманіття та функцій екосистеми.
- *кліматичні зміни*: зміни температури та режиму опадів можуть впливати на гідрологічний цикл і, відповідно, на здоров'я водних екосистем.

Але головне питання екологічної безпеки полягає в адаптація до змін. Створення стійких водних екосистем може допомогти екосистемам адаптуватися до змін, викликаних людиною і природою, зокрема до змін клімату.

В цьому сенсі, слід нагадати про дослідження, що пов'язані з таким терміном «екологічна пам'ять». Згідно з сучасними дослідженнями [8] вплив «екологічної пам'яті» на стійкість є різноманітний: залежно від часового масштабу, що розглядається, така пам'ять або прискорює, або сповільнює відновлення після збурень, таким чином підвищуючи (або знижуючи) стійкість відповідно. Довгострокова пам'ять може діяти на декількох часових шкалах через повільне (зазвичай, за степеневим законом) згасання впливу минулих станів. Крім того, в мультистабільних системах пам'ять підвищує стійкість, сприяючи збереженню початкового стабільного стану.

Визначено, що екосистема проявляє екологічну пам'ять, коли майбутні стани залежать не тільки від поточного, а й від початкового стану та траєкторії [8]. Екологічна пам'ять стосується впливу минулих подій на реакцію екосистеми на екзогенні або ендегенні зміни. Вона визнана ключовим фактором динаміки екосистем та інших складних систем. Проте, кількісні моделі угруповань часто ігнорують пам'ять та її наслідки. Після припинення збурення пам'ять спочатку прискорює повернення до початкового стану, але потім уповільнює його на пізніх стадіях відновлення.

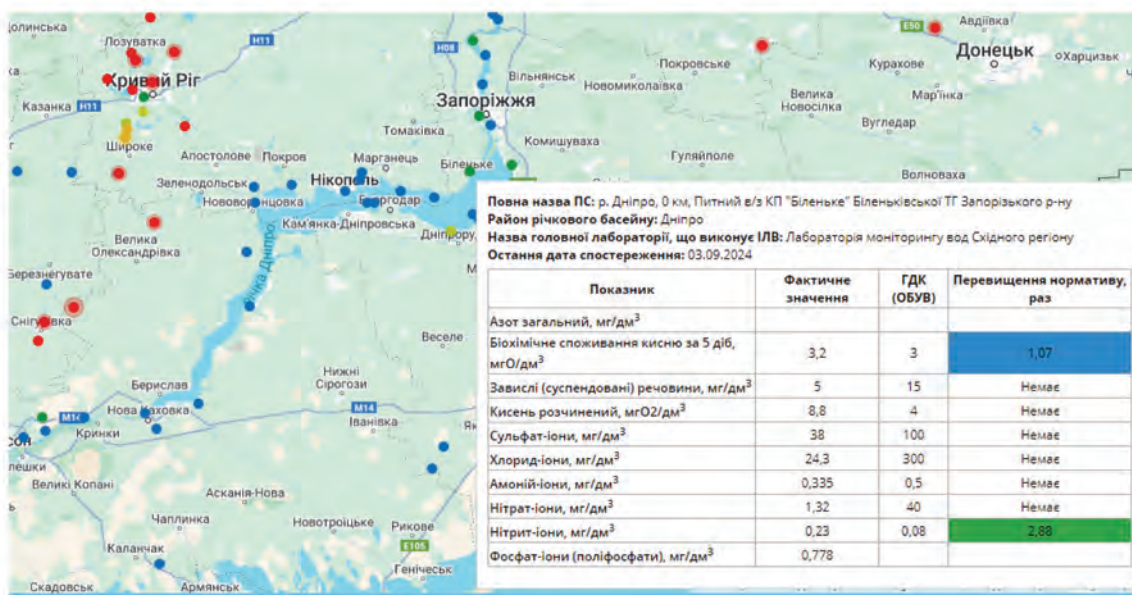
Проведений аналіз досліджень та публікацій свідчить, про різноманітність та багатокомпонентність підходів до оцінювання стійкості водних екосистем. Вони містять значну кількість показників, критеріїв та шкал. Вибір необхідних методологій залежить від особливостей водного об'єкту, що досліджується. Однак, інтегральні підходи найчастіше використовуються для відстеження певних закономірностей у підтримці стійкості, а також для виявлення, систематизації та визначення взаємозв'язків між компонентами водної екосистеми та факторами, що найбільше впливають на її стан. Саме тому, виникає необхідність оцінити умови стійкості водної екосистеми в нижній частині річки Дніпро в умовах руйнування Каховського водосховища методами комплексних індексів [9].

## Мета роботи

Оцінка потенціалу екологічної стійкості природної водної екосистеми нижнього Дніпра, тобто її здатність самовідновлюватися, в умовах антропогенного тиску руйнування Каховського водосховища.

## Результати дослідження

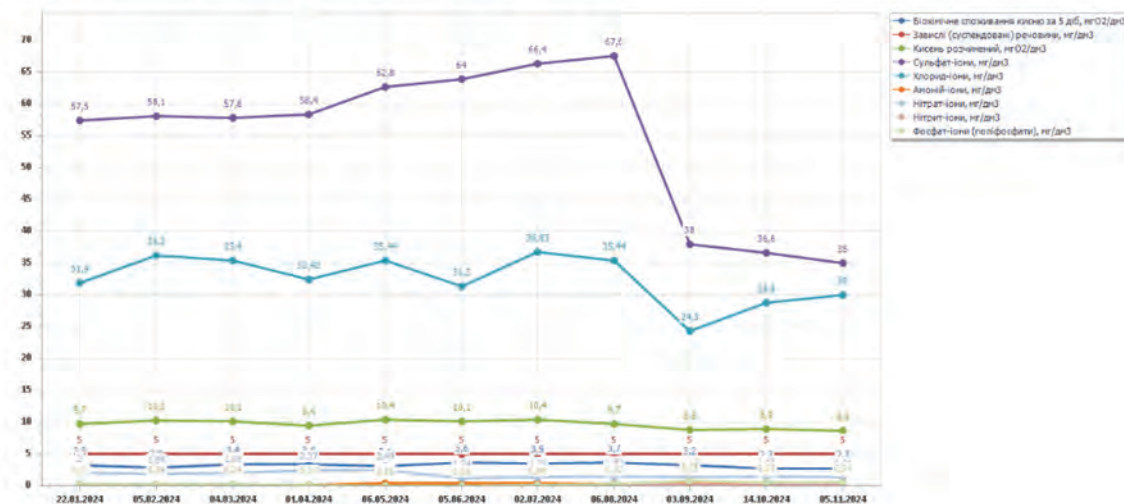
Здійснення оцінки стійкості водної екосистеми нижнього Дніпра в сучасних умовах проведено з використанням даних моніторингу Державного агентства водних ресурсів України по постах на річки Дніпро в Запорізькій та Херсонській областях та річки Інгулець [9] (рис. 1, а; 2, а).



а)

По посту: р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП "Біленьке" Біленьківської ТГ Запорізького р-ну

Значення	Показники									
	Амоній-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Біохімічне споживання кисню за 5 дб, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Завислі (супендовані) речовини, мг/дм <sup>3</sup>	Кисень розчинений, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Нітрат-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Нітрит-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Сульфат-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Фосфат-іони (поліфосфати), мг/дм <sup>3</sup>	Хлорид-іони, мг/дм <sup>3</sup>	
22.01.2024	0.12	3.30	5.00	9.70	2.00	0.05	57.00	0.30	31.90	
05.02.2024	0.11	2.90	5.00	10.30	1.94	0.05	58.10	0.29	36.30	
04.03.2024	0.08	3.40	5.00	10.10	1.98	0.05	57.30	0.29	35.40	
01.04.2024	0.19	3.40	5.00	9.40	2.37	0.05	56.40	0.07	32.42	
06.05.2024	0.43	3.10	5.00	10.40	2.46	0.05	62.80	0.05	36.44	
05.06.2024	0.42	3.60	5.00	10.10	1.24	0.04	64.00	0.00	31.30	
02.07.2024	0.35	3.50	5.00	10.40	1.29	0.10	66.40	0.03	36.33	
06.08.2024	0.31	3.70	5.00	9.70	1.43	0.10	67.00	0.22	35.44	
03.09.2024	0.34	3.20	5.00	8.80	1.32	0.23	38.00	0.78	24.30	
14.10.2024	0.14	2.70	5.00	8.90	1.43	0.10	36.00	0.55	28.30	
05.11.2024	0.17	2.70	5.00	8.80	1.34	0.10	35.00	0.54	30.00	

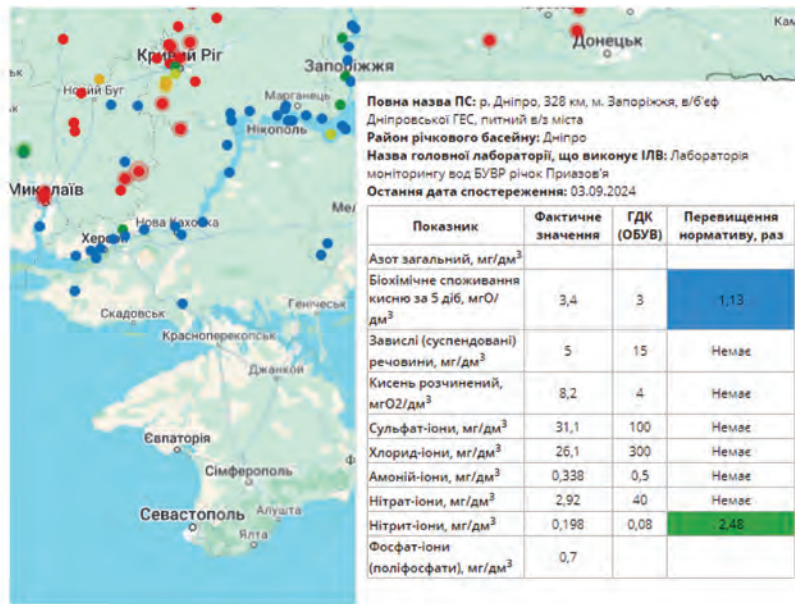


б)

Рисунок 1. Пост р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП «Біленьке» Біленьківської ТГ Запорізького р-ну: а – географічне розташування, б – данні моніторингу

Розрахунок індексів якості води (WQI) або екологічної стійкості, трофічного стану та самоочищення для нижнього Дніпра вимагає використання даних про якісний стан води, таких як концентрація забруднювальних речовин, показники біологічної активності, гідрохімічні та

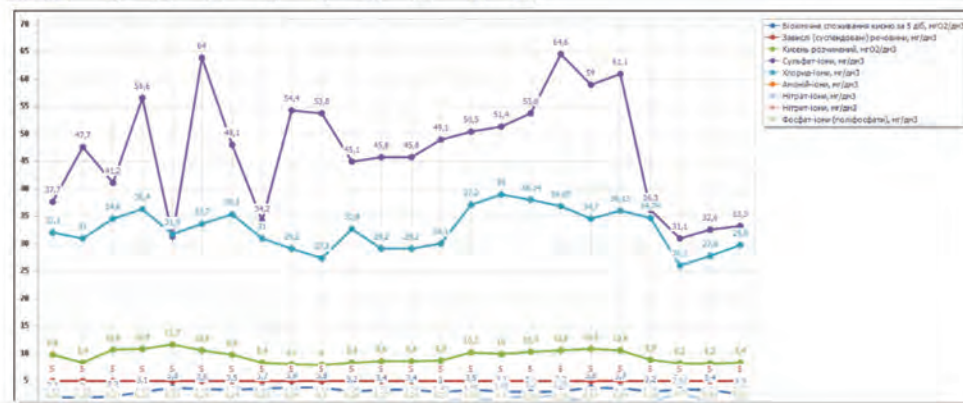
гідробіологічні параметри. В дослідженні автори статті використали данні по двох постах спостереження р. Дніпро [10] (рис. 1, б; 2, б). Дані моніторингу по інших постах р. Дніпро не інформативні з точки зору кількості спостережень, тому вони не використовувались для аналізу.



а)

По посту: р. Дніпро, 328 км, м. Запоріжжя, в/б'єф Дніпровської ГЕС, питний в/з міста

Значення	Позначення	Амоній-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Біохімічне споживання кисню за 5 діб, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Завислі (супендовані) речовини, мг/дм <sup>3</sup>	Кисень розчинений, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Нітрат-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Нітрит-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Сульфат-іони, мг/дм <sup>3</sup>	Фосфат-іони (поліфосфати), мг/дм <sup>3</sup>	Хлорид-іони, мг/дм <sup>3</sup>
31.12.2023	0,19	2,10	5,00	9,90	0,99	0,04	27,70	0,28	32,10	
16.01.2024	0,16	2,30	5,00	3,40	1,31	0,05	47,70	0,22	31,20	
14.02.2024	0,22	2,20	5,00	10,30	1,95	0,07	41,20	0,21	34,80	
13.03.2024	0,21	3,10	5,00	10,90	1,01	0,07	56,80	0,22	38,40	
19.04.2024	0,29	3,80	5,00	11,70	1,02	0,07	91,50	0,23	31,90	
01.05.2024	0,45	3,80	5,00	10,90	1,08	0,08	84,00	0,24	33,70	
05.06.2024	0,45	3,90	5,00	9,30	1,29	0,08	48,10	0,24	33,80	
04.07.2024	0,25	3,70	5,00	8,40	1,01	0,03	34,20	0,23	37,20	
07.08.2024	0,37	3,80	5,00	5,10	1,14	0,04	84,40	0,24	29,20	
04.09.2024	0,14	3,80	5,00	8,00	1,14	0,04	53,80	0,20	27,80	
09.10.2024	0,18	3,20	5,00	8,40	1,28	0,04	45,10	0,20	32,80	
08.11.2024	0,10	3,40	5,00	8,90	1,31	0,04	48,80	0,21	29,20	
06.12.2024	0,11	3,40	5,00	8,80	1,24	0,05	45,80	0,20	29,20	
08.01.2024	0,11	3,20	5,00	8,60	1,42	0,08	48,10	0,21	30,10	
05.02.2024	0,14	3,50	5,00	10,30	1,65	0,06	60,50	0,23	37,20	
04.03.2024	0,02	3,20	5,00	18,00	1,95	0,06	51,40	0,30	39,00	
02.04.2024	0,18	3,10	5,00	10,40	2,20	0,04	53,80	0,26	38,14	
06.05.2024	0,37	3,20	5,00	10,50	2,39	0,06	54,60	0,26	38,37	
05.06.2024	0,38	3,80	5,00	10,90	0,90	0,04	59,00	0,27	34,70	
02.07.2024	0,25	3,70	5,00	10,50	1,10	0,09	51,10	0,27	38,13	
06.08.2024	0,20	3,20	5,00	3,90	1,19	0,06	38,30	0,21	34,74	
05.09.2024	0,34	3,40	5,00	8,20	2,95	0,20	31,10	0,19	28,70	
14.10.2024	0,10	3,40	5,00	8,20	1,22	0,02	32,80	0,22	27,80	
05.11.2024	0,10	2,70	5,00	8,40	1,35	0,03	33,30	0,22	29,90	



б)

Рисунок 1. Моніторинг за даними поста спостереження. Пост р. Дніпро, 328 км, м. Запоріжжя, в/б'єф Дніпровської ГЕС: а – географічне розташування, б – данні моніторингу

Для оцінки стійкості водної екосистеми нижнього Дніпра по даних поста р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП «Біленьке» Біленьківської ТГ Запорізького р-ну (табл. 1), розраховано індекс самоочищення (індекс розкладання) IS, який харак-

теризує здатність водного об'єкту до природного відновлення та враховує наступні першочергові показники забруднення водою: кисень розчинений, мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> (О<sub>2</sub>); біохімічне споживання кисню за 5 діб, мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> (БСК<sub>5</sub>).

Формула для розрахунку IS має вигляд:

$$IS = \frac{[O_2]}{BCK_5}$$

Динамічна характеристика зміни індексу самоочищення з часом має наступний графічний вигляд (рис. 3).

Вищий показник IS свідчить про більшу здатність річки до самоочищення. При цьому, графік індексу самоочищення показує, що: у першій частині графіка (вимірювання січень-квітень 2024 р.) значення IS дещо коливаються. Вже з травня є підйоми і невеликі спадання, які можуть вказувати на локальні фактори (зміна руху течії, збільшення або зменшення температури); найнижче значення у вимірюванні було у серпні (2,622), а найвище, у лютому (3,552).

З точки зору тенденцій, варто звернути увагу на виявлений підйом наприкінці графіка (вимірювання у серпні). Збільшення кількості опадів посприяло збільшенню значення індексу. І навпаки, засушливе літо сприяє зниженню показника. Підвищення BCK<sub>5</sub> знижує значення IS, тобто збільшується рівень забруднення.

Кореляція між BCK<sub>5</sub> та IS достатньо висока та від’ємна, коефіцієнт кореляції (Kкор) дорівнює – 0,779. Збільшення [O<sub>2</sub>] за рахунок аерації практично не впливає на самоочищення, тому маємо статистично низький Kкор (0,170603). Kкор між BCK<sub>5</sub> та [O<sub>2</sub>] дорівнює 0,481.

Це вказує на слабку позитивну кореляцію, а саме: коли значення BCK<sub>5</sub> зростають, рівень розчиненого кисню [O<sub>2</sub>] теж має тенденцію к зростанню. Лінійний тренд кривої індексу самоочищення має наступні риси: нахил лінії тренду – 0,0102, що свідчить про відносно незначний спад індексу самоочищення. Дуже низький коефіцієнт R<sup>2</sup> = 0,0135 вказує на те, що лінійна модель тренду не описує зміну індексу та не статистично значуща.

В загальному вигляді, аналіз даних моніторингу, свідчить про те, що здатність річки до самоочищення близька до постійної, маючи незначні коливання залежно від повені. Середній показник індексу самоочищення дорівнює 3,02, що вказує на хорошу якість води та високу здатність річки до природного самовідновлення.

Таблиця 1

**Показники параметрів та результат IS**

Дата	01.24	02.24	03.24	04.24	05.24	06.24	07.24	08.24	09.24	10.24	11.24
BCK <sub>5</sub>	3.3	2.9	3.4	3.4	3.1	3.6	3.5	3.7	3.2	2.7	2.7
O <sub>2</sub>	9.7	10.3	10.1	9.4	10.4	10.1	10.4	9.7	8.8	8.9	8.6
IS	2,939	3,552	2,971	2,765	3,355	2,806	2,971	2,622	2,75	3,296	3,185



Рисунок 3. Динамічна характеристика зміни індексу самоочищення з часом

Наступний індекс, який був розрахований по посту р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП «Біленьке» Біленьківської ТГ Запорізького р-ну, це індекс евтрофікації (EI) з використанням формули:

$$EI = \frac{(NO_3 + PO_4)}{2}$$

Для розрахунку використані дані (табл. 2) концентрації азоту у вигляді нітратів ( $NO_3^-$ , мг/дм<sup>3</sup>) та концентрація фосфору у вигляді ортофосфатів ( $PO_4^-$ , мг/дм<sup>3</sup>).

Динамічна характеристика зміни індексу евтрофікації з часом, має графічний вигляд (рис. 4).

Значення Ккор між показниками EI та нітрат іонами дуже високий та дорівнює 0,853, але Ккор між EI та фосфат іонами дуже низький – 0,108. Тобто, EI зростає зі збільшенням нітрат іонів, що свідчить про те, що чим менше нітратів, тим більше сприятливими є тенденції стійкості. Тим часом, Ккор між двома масивами фосфат та нітрат іонів – від'ємний (-0,427), що свідчить про слабку обернено пропорційну залежність.

Стійкість екосистеми води за значенням індексу евтрофікації, загалом оцінюється наступним чином:

1. *Низький рівень евтрофікації ( $EI < 1,0$ ).* Екосистема водоймища має високу стійкість проти евтрофікації. Водоймище слабо піддається зростанню водоростей та інших евтрофікаційних процесів.

2. *Середній рівень евтрофікації ( $1,0 < EI < 2,0$ ).* Екосистема водоймища має середню стійкість проти евтрофікації. Водоймище може періодично піддаватися зростанню водоростей та інших евтрофікаційних процесів, але ще не досягло критичної точки.

3. *Високий рівень евтрофікації ( $EI > 2,0$ ).* Екосистема водоймища має низьку стійкість проти евтрофікації. Водоймище піддається сильному зростанню водоростей та інших евтрофікаційних процесів, що може привести до зниження якості води та втрати біорізноманіття.

В даному дослідженні, середнє значення EI = 1,0, тобто, водоймище має високу стійкість

Таблиця 2

Показники параметрів, розрахунок EI

Дата	01.24	02.24	03.24	04.24	05.24	06.24	07.24	08.24	09.24	10.24	11.24
$NO_3^-$	2	1,94	1,98	2,37	2,49	1,24	1,29	1,43	1,32	1,43	1,34
$PO_4^-$	0,3	0,29	0,29	0,07	0,06	0,06	0,08	0,22	0,78	0,55	0,54
EI	1,15	1,115	1,135	1,22	1,27	0,65	0,685	0,825	1,05	0,99	0,94

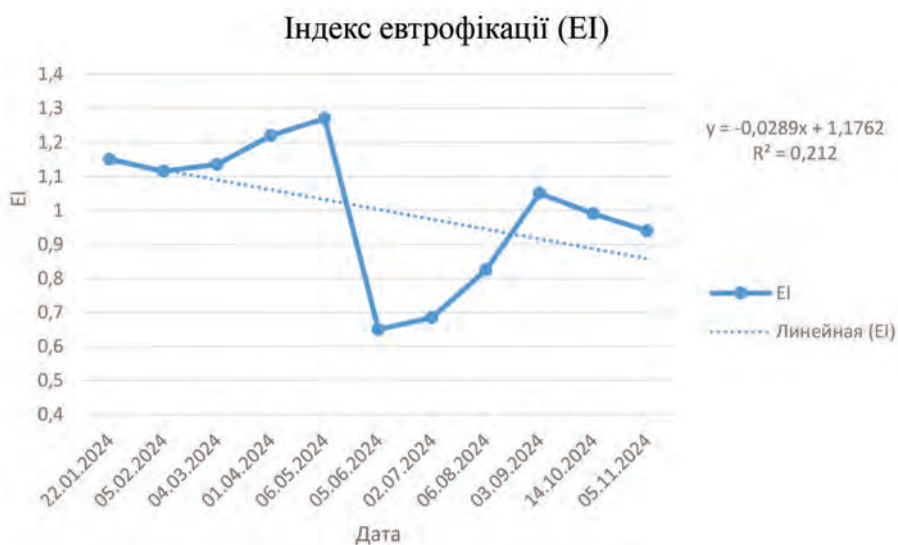


Рисунок 4. Динамічна характеристика зміни індексу евтрофікації з часом (2024 р.)

проти евтрофікації. Це означає, що екосистема водоймища відносно стабільна і мало піддається змінам, пов'язаним з евтрофікацією. Однак, потрібно пам'ятати, що цей індекс тільки один з багатьох факторів, що впливають на стійкість екосистеми.

Інші чинники, такі як температура, кислотність, коливання рівня води та діяльність людини, також можуть впливати на екосистему водоймища.

Наступні індекси які розраховані та проаналізовані в дослідженні, це індекс якості води (WQI) та індекс самоочищення (IS), що вимагає використання даних про якісний стан води, таких як концентрація забруднювальних речовин, показники біологічної активності, гідрохімічні та гідробіологічні параметри [9].

Для розрахунку WQI використовуються формула:

$$WQI = \frac{C}{ГДК} * 100$$

де:  $C$  – фактична концентрація показника в воді (мг/дм<sup>3</sup>),

$ГДК$  – максимально допустима концентрація для цього показника (мг/дм<sup>3</sup>).

Значення показників: 1. Хімічного складу води (рівень забруднювальних речовин, наприклад, нітрати, фосфати, нафтопродукти, важкі метали тощо); 2. Гідробіологічні характеристики (кисневий режим, біохімічна потреба в кисні – БПК, кількість зоопланктону, фітопланктону тощо); 3. Фізико-хімічні показники (температура, каламутність, рН).

Дані посту спостереження р. Дніпро, 328 км, м. Запоріжжя, для аналізу та розрахунку Індексу WQI за період 2022-2024 років:

Амоній-іони: 0,19; 0,19; 0,22; 0,21; 0,29; 0,45; 0,45; 0,29; 0,31; 0,14; 0,18; 0,1; 0,11; 0,11; 0,14; 0,02; 0,18; 0,37; 0,38; 0,35; 0,29; 0,34; 0,1; 0,16 (мг/дм<sup>3</sup>). ГДК = 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Біохімічне споживання кисню (БПК5): 2,1; 2; 2,2; 3,1; 3,8; 3,6; 3,5; 3,7; 3,9; 3,8; 3,2; 3,4; 3,4; 3; 3,5; 3,2; 3,1; 3,2; 3,8; 3,7; 3,2; 3,4; 3,4; 2,7 (мг/дм<sup>3</sup>). ГДК = 3 мг/дм<sup>3</sup>

Нітрат-іони: 0,98; 1,01; 1; 1,01; 1,02; 1,08; 1,27; 1,01; 1,14; 1,14; 1,26; 1,31; 1,24; 1,42; 1,55; 1,95; 2,2; 2,35; 0,96; 1,1; 1,16; 2,92 (мг/дм<sup>3</sup>). ГДК = 40 мг/дм<sup>3</sup>

Хлорид-іони: 32,1; 31; 34,6; 36,4; 31,9; 33,7; 35,5; 31; 29,2; 27,5; 32,8; 29,2; 29,2; 30,1; 37,2; 39; 38,14;

36,87; 34,7; 36,13; 34,74; 26,1; 27,8; 29,9 (мг/дм<sup>3</sup>). ГДК = 300 мг/дм<sup>3</sup>

Фосфат-іони: 0,26; 0,22; 0,21; 0,22; 0,23; 0,24; 0,24; 0,23; 0,24; 0,3; 0,28; 0,27; 0,26; 0,27; 0,28; 0,3; 0,05; 0,05; 0,07; 0,07; 0,21; 0,7; 0,52; 0,052 (мг/дм<sup>3</sup>). ГДК = 0,5 мг/дм<sup>3</sup> (можна використовувати для стандартних умов)

Нітрит-іони: ГДК = 0,08 мг/дм<sup>3</sup> Дані: 0,04; 0,05; 0,07; 0,07; 0,07; 0,08; 0,05; 0,03; 0,04; 0,04; 0,04; 0,04; 0,05; 0,06; 0,05; 0,06; 0,04; 0,05; 0,04; 0,09; 0,06; 0,2; 0,02; 0,03 (мг/дм<sup>3</sup>).

Потім обчислюємо середнє значення індексу для окремих показників та для сукупності.

Розрахунок індексу WQI для кожного параметра:

*Амоній-іони*: максимальна концентрація 0,45 мг/дм<sup>3</sup>; мінімальна концентрація 0,02 мг/дм<sup>3</sup>; середня концентрація 0,24 мг/дм<sup>3</sup>. Індекс WQI: 0,51

*Біохімічне споживання кисню (БПК5)*: максимальна концентрація 3,9 мг/дм<sup>3</sup>; мінімальна концентрація 2 мг/дм<sup>3</sup>; середня концентрація 3,2 мг/дм<sup>3</sup>. **Індекс WQI: 0,84**

*Нітрат-іони*: максимальна концентрація 2,92 мг/дм<sup>3</sup>; мінімальна концентрація 0,96 мг/дм<sup>3</sup>; середня концентрація 1,42 мг/дм<sup>3</sup>. **Індекс WQI: 0,04**

*Хлорид-іони*: максимальна концентрація 39 мг/дм<sup>3</sup>; мінімальна концентрація 26,1 мг/дм<sup>3</sup>; середня концентрація 32,4 мг/дм<sup>3</sup>. **Індекс WQI: 0,11**

*Фосфат-іони*: максимальна концентрація 0,7 мг/дм<sup>3</sup>; мінімальна концентрація 0,05 мг/дм<sup>3</sup>; середня концентрація 0,24 мг/дм<sup>3</sup>. **Індекс WQI: 0,51**

*Нітрит-іони*: максимальна концентрація 0,2 мг/дм<sup>3</sup>; мінімальна концентрація 0,02 мг/дм<sup>3</sup>; середня концентрація 0,06 мг/дм<sup>3</sup>. **Індекс WQI: 0,79**

Кінцевий індекс WQI розраховуємо як середнє значення індексів усіх параметрів:

$$WQI = (0,51 + 0,84 + 0,04 + 0,11 + 0,51 + 0,79) / 6 = 0,55$$

Тобто, у відсотковому відношенні, індекс WQI має значення 55. Це вказує про хорошу якість води (табл. 3). Однак, необхідно пам'ятати, що індекс WQI є оцінкою якості води тільки для певного набору параметрів і не може бути використаний самостійно для оцінки якості води.

Враховуючи, що індекс WQI нижче 60, води знаходяться в задовільному стані і можуть бути використані для потреб населення (середня якість

## Шкала якості води при різних значеннях WQI

Значення WQI	0-25	25-50	50-75	75-100	100
Характеристика	дуже погана якість води	погана якість води	середня якість води	хороша якість води	ідеальна якість води

води). Проте, варто продовжувати контролювати якість води для запобігання зміни її стану.

Ще один показник, який можна використовувати в дослідженнях екологічної стійкості – це відмінність між гранично допустимим (С) ГДК) і фактичним станом середовища (С), яка складає екологічний резерв довкілля (ER). Цей показник характеризує здатність до відновлення або відтворення та є основою для розрахунку допустимих навантажень. Наприклад, припустимо, що С (ГДК) для певного параметра якості води (наприклад, сульфат-іони, мг/дм<sup>3</sup>) встановлено на рівні 100 мг/дм<sup>3</sup>. Після руйнації водосховища фактичний рівень кисню в воді зафіксований 31,1 мг/дм<sup>3</sup>. Тобто, показник  $ER = 100 - 31,1 = 68,9$  (мг/дм<sup>3</sup>). Це приклад того, що існує екологічний резерв у кількості 68,9 мг/дм<sup>3</sup> і екосистема має потенціал для відновлення.

Розрізняють два підходи визначення допустимих навантажень: санітарно-гігієнічний та екологічний. Вони розрізняються рівнем певних вимог. Наприклад, до критеріїв оцінки небезпеки поширення в навколишньому середовищі різних видів забруднень відносять: гранично допустиму концентрацію (ГДК); гранично допустимий викид (ГДВ) і стрес-індекс; гранично допустимі екологічні навантаження (ГДЕН); максимально допустимий рівень (МДР); кризисні екологічні ситуації (КЕС) та показник екологічного резерву.

ГДК встановлюється головними санітарними інспекціями в законодавчому порядку або рекомендується відповідними організаціями, комісіями на основі результатів складних експериментів, а також відомостей, отриманих в час або після різних аварій, катастроф тощо.

Важливість показника ER має наступний сенс: наявність екологічного резерву є критично важливою для управління природними ресурсами та розробки ефективних стратегій відновлення та збереження екосистем. Чим більший екологічний резерв, тим більшою мірою, буде

успішне відновлення екосистеми після руйнації. Визначення екологічного резерву також допомагає в оцінці ефективності заходів, спрямованих на пом'якшення наслідків руйнації та в плануванні майбутніх відновлювальних заходів.

## Висновки

В сучасних умовах розвитку технологій оцінки рівня екологічної безпеки природно-територіального комплексу (ПТК), існує багато методів оцінки стійкості (індекс самоочищення, індекс евтрофікації, індекс якості води), але їх застосування має певні обмеження для коректного аналізу за рахунок відсутності повноцінних та регулярних даних моніторингу нижнього Дніпра. За результатами проведеної оцінки стійкості екосистеми нижнього Дніпра, виявлено, що здатність до самоочищення річки Дніпро демонструє стійкість, але з певними коливаннями: розрахунок індексу самоочищення (IS) показав, що річка має досить високу здатність до самоочищення, але її показники залежать від сезону та кількості опадів. Розрахунок індексу евтрофікації (EI) вказує на помірний рівень евтрофікації, тобто на відносну стійкість екосистеми. Вплив фосфатів на евтрофікацію виявився слабкішим, ніж нітратів. Значення якості води (WQI) біля Запоріжжя вказує на середню якість води та задовільний стан, але потребує постійного контролю. Хоча розраховані індекси надають корисні відомості, вони не дають повної інформації стосовно рівня екологічної безпеки ПТК. Результати розрахунків слід розглядати як частину комплексної оцінки, а не як визначальний фактор. При розрахунках, кореляція між різними показниками була неоднозначна, що тільки підкреслює складність взаємозв'язків в екосистемі. Саме тому, оцінка стійкості екосистеми вимагає детальніших подальших досліджень з використанням повноцінного набору даних і більш складних моделей.

### Список використаних джерел

1. Суходольська І.Л., Грубінко В. В. Основні підхід до оцінювання стійкості водних екосистем. Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол., 2021. Т 81, № 35. С. 55–69. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.21.3.8>
2. Azarov, S. I., & Zadunaj, O. S. (2020). Аналіз методичних підходів до оцінювання стійкості екосистем. Екологічна безпека та природокористування, 34(2), 99–110. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.99-110>
3. Гавриленко О.Т. Геоекологічне обґрунтування проектів природокористування: Навч. посіб. – К.: Ніка-Центр, 2003. – С. 22.
4. Грачев А. Карти України. Екологія, 2021 <https://geomap.land.kiev.ua/ecology-10-2.html>
5. Wang, K., Zhai, X. The creation of «Ecosystem Core» hypothesis to explain ecosystem evolution. BMC Ecol 19, 33 (2019). <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0251-y>
6. Chapin FS, Matson PA, Vitousek PM. Principles of terrestrial ecosystem ecology, 2nd ed. New York: Springer, 2011.
7. Odum EP. Fundamentals of ecology, 3rd ed. New York: Saunders, 1971c.
8. Moein Khaligh, Guilhem Sommeria-Klein, Didier Gonze, Karoline Faust, Leo Lahti. Quantifying the impact of ecological memory on the dynamics of interacting communities June 3, 2022, <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009396>
9. Метод комплексних індексів. Он-лайн навчальний посібник. [https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1175235/45\\_-43-56.pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1175235/45_-43-56.pdf)
10. Державне агентство водних ресурсів України. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України.. <http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index>

UDC 911.9:502.132(477.44-25)  
<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-10>

## PROTECTING URBAN BIODIVERSITY BY DEVELOPING URBAN ECO-NETWORKS

**Radomska M. M., Huz V. V.**

State University «Kyiv Aviation Institute»

L. Huzar Ave., 1, Kyiv, 03058

*m.m.radoms kaya@gmail.com,*

*6856368@stud.kai.edu.ua*

This paper presents an analysis of the current issues of biodiversity conservation in urban areas with a primary focus on the development of eco-networks. Artificial structures span through and beyond cities, creating obstacles to the mobility, reproduction, and survival of the animals. Urban biodiversity is crucial for the functioning of an ecosystem. Thus, its degradation imposes risks to the well-being of the citizens. The purpose of this research is to analyze the current trends in eco-networks development in cities around the world and take into account their specific features while adapting this experience to the Ukrainian condition. Eco-networks of five cities outside the European continent, as well as preliminary designs made for four Ukrainian cities, were studied and generalized to formulate an efficient protection strategy for biodiversity in Ukrainian cities. The majority of the used research works were built on spatial analysis, aided by GIS, and spatial parameters synthesis. A major issue for the functional ability of the urban eco-networks is a lack of connectivity, which is managed differently in the studied cases, with the key differences being: the use of barren lands, constructing green roofs and small squares, legal land withdrawal from the practical use or the addition of wildlife safety parameters to the patches of urban agricultural lands. It is shown that Ukrainian cities have begun working on assessing their eco-networks and determining hotspots for connectivity. The practical part of the work involved developing an eco corridors project for the city of Kyiv. The analysis of the most important threats to biodiversity on the city grounds was conducted, and core areas were defined. Four corridors, as well as additional elements

of green infrastructure to fill the available gaps, were offered based on a spatial analysis. Additionally, the prospects of expanding green areas in northern districts of Kyiv were considered and implemented in the general eco-network structure.

**Keywords:** fragmentation, eco corridors, urban environment.

### Introduction

An ecological network is created with interconnected natural areas that together form a functional system, providing the conditions for organisms to exist and benefit the environment. The central aim of creating eco-networks is to conserve biodiversity and support its vital functions so that essential ecosystem processes are not disrupted. Integrity, continuity, and diversity of habitats are crucial for the environmental balance and the resilience of an ecosystem.

Urbanization and drastic changes in land use over the past centuries have led to the reduction and fragmentation of natural habitats worldwide. This poses a long-term threat to biodiversity. Conservation success depends on preserving a stable landscape to guarantee regular gene flow and movement between populations. However, man-made structures have turned into artificial barriers, jeopardizing wildlife population survival. The fact that cities are still a part of animal habitats and so they must provide conditions for safe movement has already been established in the science of biodiversity conservation, but unfortunately, it is still not being recognized in either the theory or practice of urban planning and design.

Ensuring the coherence of ecological networks and addressing threatening barriers is crucial for supporting the survival of species, typical to natural and semi-natural habitats.

This research aims to analyze the available experience of developing ecological networks in cities around the world, define the principles of creating one, and apply this knowledge in the city of Kyiv.

Analysis of the current level of urban eco-networks development

Since the 1980s, environmental research has focused on the tasks of building and expanding ecological networks [1]. Identifying, designating, and protecting ecological networks helps to maintain biodiversity and reduce isolation in fragmented landscapes, which constantly expand due to human habitation.

The concept of greenway and green space planning has been forming for over a century. Early examples were built on the natural wilderness areas, such as the Adirondack Park Region Concept in the United States have laid a general foundation for modern greenway planning [2]. Later, it became clear that special measures must be taken to maintain, enhance, or restore connectivity between protected areas [3]. Throughout the 20th century, cities started to invest efforts to preserve their greenery and expand it. Later researchers have demonstrated that urban environments are too fragmented to provide a reliable foundation for urban biodiversity conservation without connectivity and even the best parks and wilderness areas separated by human interventions gradually degrade and lose their resilience [4].

An eco-network includes a core zone, a buffer zone, and corridors. These are essential elements and eco-networks can function properly only if they are present and interact properly [5]. Core areas, whether legally protected or managed with conservation-oriented approaches, act as focal points for biodiversity conservation efforts. They provide crucial habitats and resources for various species and ensure the ecosystem is balanced. Buffer zones surrounding these core areas protect them from negative effects and mitigate pressure from human activity in the area. They also work as transitional zones where conservation areas and commercial areas can gradually change from one to another. The ecological corridors provide connectivity, enabling wildlife interaction on an individual level as well as the exchange of genetic

material, essential for the species' survival and ecosystem resilience. These areas must be sufficiently large and diverse to accommodate species with different biology, living needs, and behavior.

However, forming any or even all elements of an eco-network in cities can be compromised by construction and transport limitations. Creating ecological networks within cities worldwide represents a paradigm shift in urban planning and environmental management. Therefore, it is necessary to look for or develop special approaches to accommodate the needs of ecological connectivity within cities. The following cities represent successful compromises between urban development and habitat conservation, developed using various methods of spatial analysis.

Fuzhou City in China faced challenges due to intensive growth. The idea there was focused on transforming barren land into parkland to bolster connectivity within Fuzhou City's ecological network [6]. Additionally, key barriers within the network were identified, and opportunities for ecological restoration were explored. Findings showed that developing bare land into an ecological source yielded better results than converting existing land into woodland. Currently, Fuzhou City's ecological network comprises 44 source sites and 92 corridors, providing a robust framework for biodiversity conservation in the urban landscape. Thus, transforming 30% of barren land patches into green spaces or parks proved to be the most impactful strategy for enhancing connectivity within Fuzhou City's ecological networks.

For Tabriz, Iran there was a comprehensive framework developed. It was based on the analysis of land use changes spanning from 1984 to 2020, using a thorough examination of multi-temporal satellite images and landscape metrics as a source [7]. This approach aimed to evaluate the current ecological connectivity of the study area and propose optimal corridors for a minimal cost. Furthermore, the evaluation of ecological connectivity in the Tabriz landscape using Cohesion and IIC indices revealed an increasing uniformity of developed lands and the fragmentation of ecological spaces. This gradual transformation progressively dominated the Tabriz landscape, while green areas have become increasingly disjointed.

The areas with the highest population density were identified and cost-effective corridors were then

created using graph theory to connect these key areas with consideration to ecological spaces such as farmlands, green spaces, and water bodies, as well as unoccupied lands within the city. However, it is essential to acknowledge that this project primarily focused on the historical and current state of the city, which may have entailed certain limitations and uncertainties, warranting further investigation.

The analysis of ecological networks based on ground cover and urban habitat maps was also performed in Suwon, South Korea [8]. The priority areas for protection were identified, and an ecological network was established by integrating results from both maps. Discrepancies were observed between the two maps, particularly concerning water bodies, agricultural lands, bare areas, and forests. While the urban habitat map highlighted high connectivity for water bodies and agriculture, the ground cover map showed elevated connectivity for forests, bare lands, and wetlands. In particular, it was noted that different types of green areas varied in their level of contribution. Mountain forests and remnant forest areas were well protected but lacked connectivity with other areas. Streams and linear patches significantly enhanced connectivity due to their branching structure. Additional contribution was made by agricultural areas, which were not inhabited on a regular basis, but provided ways of transition and connectivity. The combination of these aspects was used to build a functional eco-network, where the most vulnerable sections were defined and protected.

Harbin, China, has a total of 198 ecological areas that span over 65 thousand ha [9]. However, older districts like Daowai, Xiangfang, and Nangang have small, fragmented patches with high internal porosity, necessitating urgent measures to establish an ecological network for integration. At the same time, newer districts like Songbei, Hulan, and Acheng show a stronger ecological foundation. The ecological network in the study area includes 119 ecological zones with certain protected status and 142 ecological corridors. The best level of connectivity is common for watersheds and areas of green fields, while woodlands are fewer and some remain isolated. Ecological corridors, especially in Hulan, Xiangfang, and Nangang, face challenges due to urban construction, while Songbei and Acheng districts have more established corridors. Optimization of the ecological network was built on the edge-adding strategy

from complex network theory, optimized for the given purpose. By implementing this modified strategy researchers were able to develop 43 ecological corridors, resulting in a more resilient and interference-resistant network.

Bogotá, Colombia, has conceptualized and embraced the Environmental Enhancement Plan (EEP) as a network of green and blue infrastructures aimed at safeguarding and restoring the essential ecological processes [10]. This initiative seeks to enhance the well-being of Bogotá's population by protecting various types of natural and semi-natural spaces, including protected areas, metropolitan parks, and ecological corridors. The EEP serves multiple purposes, including recreation, urban enhancement, risk prevention, and runoff control. A particular attention is given to the hills surrounding the eastern part of the city, known as the «Cerros Orientales de Bogotá». It is protected as an official reserve, serving as an ecological corridor. Despite the legal protection status, urban growth has already started to spread in that area. In response, a court order issued by the state of Colombia mandated the establishment of an adequate strip of land to maintain a socio-ecological corridor aimed at fostering citizen engagement with the hills. The same area serves as an ecological corridor through the city. This decision was aimed at resolving a social issue but it has successfully accommodated a solution to an ecological problem, which is interconnected in essence.

Urban eco-networks have shown to be successful because of the alternative green infrastructure: research conducted in Beijing and Wuhan demonstrates the efficiency of such strategies as green roofs and forest conversion in enhancing urban connectivity [11].

In Ukraine, attempts to develop urban eco-networks have been made in the past. In particular, the structural elements and potential additions to provide better connectivity for the ecological network of the city of Kremenchuk were offered [12]. Similarly, the quantitative and qualitative indicators of the natural reserve fund of the city of Khmelnytsky were studied, and the core elements of the network were defined [13]. A serious problem for the given city eco-network was noted: the low protected status of the core areas and the absence of connective areas.

In the structure of the city of Vinnytsia, 25 biocentres of the local ecological network were singled out.

They represent the city's different landscape types, mostly distinguished by the terrain. An important feature found in most of them is their quasi-natural status, where rare species of living organisms and plant associations are frequently seen [14].

The city of Ternopil has been studied to identify the core areas of green infrastructure, and the prospects of their expansion and conservation were established [15]. Even though the research wasn't made specifically for an eco-network, the results can be efficiently used for working out a viable plan for one.

The insights from the aforementioned examples can be used to develop the eco-networks of Ukrainian cities. The information from these studies will provide a range of important benefits to potential projects beyond protecting biodiversity, such as:

- Urban ecological networks serve as vital providers of ecosystem services and improve the well-being of the residents.
- Green spaces of ecological networks can mitigate the urban heat island effect and enhance urban climate resilience.
- Urban ecological networks significantly contribute to the improvement of air and water quality, which is essential for the health and well-being of urban residents.
- Green plants reduce the carbon footprint, regulate surface runoff, and reduce the risk of flooding and water pollution.
- By integrating green spaces and natural habitats into urban planning and development, cities can improve environmental sustainability, mitigate climate change impacts, and create healthier and more livable urban environments for present and future generations.

### **Methodology of eco-network development**

Creating an ecological network poses a number of challenges that need to be effectively addressed. The main task is to choose the most effective strategy for integrating green spaces into the urban environment and combining them into a continuous network.

Such work usually begins with a thorough analysis of the urban landscape, a study of existing green areas, and the identification of potential areas for creating new eco-networks. Collecting detailed data on the health of the ecosystem, target species and the

needs of residents is mandatory, as is identifying opportunities for the preservation and development of natural spaces.

An important aspect of this process is collecting the information and taking into consideration the requirements of all stakeholders. It is important for the successful development of an ecological network to establish several alternative routes, which ensures the selection of the optimal path through comparison.

The structure of an ecological network in the city is a key element for creating sustainable and ecologically balanced urban environments. Taking into account the diversity of urban landscapes and the needs of residents, the ecological network should have a flexible and adaptive structure.

There is a range of approaches to the process of creating an eco-network structure, which have proved to be efficient, including soil cover assessment, wildlife assessment, species habitat assessment, node analysis, connectivity analysis, network creation, etc. GIS applications provide reliable tools for exploring ecological networks and estimating connectivity between habitat patches. Multiple indices were developed to assess the connectivity within urban networks, aiding researches in choosing the most beneficial yet low-cost options for building eco-networks.

The task of the given research is to conduct a preliminary analysis of connectivity issues within the urban green infrastructure of Kyiv city. For this purpose, a combination of the aforementioned methods was used, primarily relying on Connectivity and Network Analysis to ensure that the ecological network is well-connected and functional in an urban setting.

### **Recommendations on developing an eco-network in Kyiv**

Kyiv, one of the largest cities in Ukraine, faces numerous environmental challenges stemming from intensive urbanization and industrialization. The main environmental threats that affect the functioning of ecological networks in Kyiv include environmental pollution, habitat fragmentation, invasive species, climate change, and overuse of natural resources.

The level of habitat fragmentation in Kyiv is very high in the central area, while its green belt and the Dnieper zone provide massive and reliable connec-

tivity and serve as valuable and resilient core areas. In the other cities, there is a very high porosity, and many of the ecological zones are isolated or poorly connected, limiting the survival potential of species and increasing the risk of extinction. Another considerable threat to biodiversity conservation comes from invasive species. Invasive species typical for Kyiv (e.g. Japanese clover (*Reynoutria japonica*), Marsh acacia (*Impatiens glandulifera*), Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), Mantegazzi hogweed (*Heracleum mantegazzianum*), Gray mole (*Talpa europaea*), Gray crow (*Corvus cornix*), Brown marble bug (*Halyomorpha halys*), Red fire ant (*Solenopsis invicta*), Black bass (*Micropterus salmoides*), Silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) possess danger of transforming local ecosystems, making some areas less suitable for econetworks and therefore need consistent control and management [16]. Climate change is exacerbating the environmental threats affecting Kyiv by changing temperature and precipitation patterns.

The environmental situation in Kyiv varies considerably between different districts of the city, depending on the industrial development, green areas and other factors. This complicates the development of eco-network, but places emphasis on some areas, which are more suitable and have more potential (*Desnyanskyi, Dniprovskyi, Holosiivskyi, Sviatoshynskyi districts*).

Kyiv's ecological network consists of various elements that contribute to the conservation of biodiversity, improve environmental quality, and provide places for recreation and leisure for residents. The largest and pivotal elements of eco-network for the city are natural complexes Holosiivskyi Park, Partisan Glory Park, M. Hryshko National Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro river natural complexes and the green belt of the city. In particular, the Dnipro Ecological Corridor, which runs through the city of Kyiv, is an important part of Ukraine's ecological network and is of national and European importance.

The other eco-network elements of the city include a variety of parks with different levels of adaptability for recreational activities, which can reduce their ecological functional ability. An important role is also played by lake systems and small rivers of the city.

Based on an ecological analysis, accounting for such factors as the presence of valuable natural complexes, the level of anthropogenic impact, connectivity with existing natural areas, and the potential for restoring the natural system of eco-corridors was developed for Kyiv city. These corridors' aim is to create an ecological system that will unite existing and new green areas. Within the framework of this research, four main eco-corridors in different parts of the city were identified in Obolon and Desnyanskyi districts, as illustrated in Figure 1.

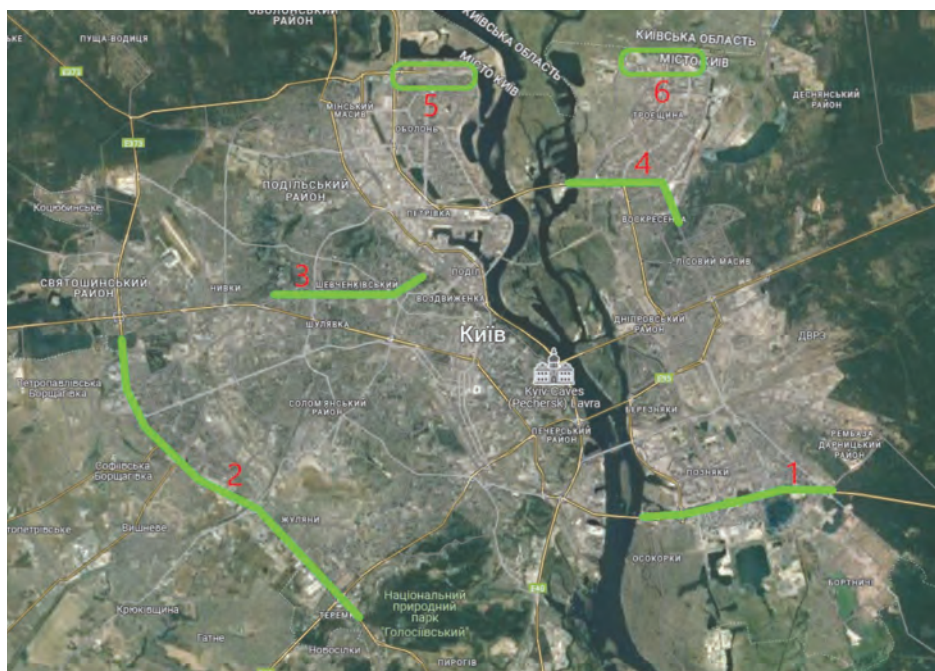


Fig. 1. Eco-network project for the city of Kyiv

Eco-corridor 1 aims to connect the coastal zone of the Dnipro with forests in the Darnytskyi district. The most important existing sites (nodes of the econetwork) for the corridor include: Pozniaky Park; Lake Lebedyne; Lake Vyrlytsia; Lake Pozniaky; Lake Sribnyi Kil. The presence of a large number of lakes was the main reason for creating this eco-corridor, which helps to improve the quality of the environment and ensures the diversity of ecosystems.

If the eco-corridor is established along the Revutskoho Street, Petra Hryhorenko Avenue, Mykola Bazhan Avenue, and the Kharkivske and Boryspil Highway, its potential for environmental enhancement becomes substantial. This route includes diverse urban landscapes, offering opportunities for strategic greening interventions. However, careful planning is required to navigate the challenges posed by infrastructure such as highways and residential complexes.

Eco-corridor 2 serves as a vital link between the forests of the Svyatoshynskyi and Golosiivskyi districts, passing through the Solomianskyi district. The corridor passes along several streets including Sadova, Soborna, Nova, Yabluneva, Zhmerynska, Zodchykh, and Lvivska, encompassing diverse habitats and landmarks such as Zhulyany airport, large commercial buildings, and Sviatoshyn forest. The most important natural sites for the corridor include: Volodymyr Poleutychy Square; Lake Vira and the park of five benches; Sviatoshynske cemetery; Green spaces near the Capital Market; The alley of the Teremky tract.

An exceptional characteristic of this corridor is its uninterrupted alignment, facilitating extensive greening efforts along its entire length. This uninterrupted pathway presents an opportunity to alleviate the adverse environmental impacts often associated with urbanization. Moreover, its alignment along less densely built areas enable easier connectivity of forests, potentially forming a «Green Ring».

Despite its advantages, the corridor encounters challenges such as railroad tracks, industrial zones, and numerous garages, necessitating careful planning and environmental protection measures. Areas lacking vegetation due to technogenic impact require enhancement through well-designed greening initiatives to improve corridor efficiency and environmental sustainability.

Eco-corridor 3 is designed to establish a vital connection between the Nyvky Park neighborhood and the verdant surroundings of Vozdvyzhenka area. By following the routes of Hlybochytska and Degtyarivska streets predominantly, this corridor aims to achieve a harmonious balance between urban development and the preservation of natural habitats. The most important natural sites for the corridor include: Munich Square; Petro Bolbochan Park; Heydar Aliyev Square; Alley of Luck Park.

An outstanding feature of this eco-corridor is its potential to accommodate a rich diversity of animals and ornamental tree species, providing habitats for many species. However, several challenges, including urban development density, narrow streets, and the prevalence of garages, must be addressed for it to succeed. To optimize the functionality of the eco-corridor, a range of small squares, green roofs and walls could be recommended.

Eco-corridor 4 is meant to provide a continuous green pathway from the Dnipro waterfront to the green areas in the Voskresensky neighbourhood. This corridor will pass through major thoroughfares, including Roman Shukhevych Avenue and Bratyslavska Street, integrating green spaces and facilitating wildlife movement through urban landscapes.

The eco-corridor will begin at the Dnipro waterfront, leveraging the natural riparian habitats, and move through residential and commercial areas, following Roman Shukhevych Avenue and Bratyslavska Street. It will end at the green areas in Voskresensky neighbourhood, connecting various squares and green spaces along the way. The most important natural sites for the corridor include: Monica's Birthday Park; General Vatutin Park; Berizka Recreation Park.

None of the offered corridors has full connectivity, therefore additional elements of green infrastructure were offered for each (Fig. 2). Creating new green spaces and eco-corridors in Obolon and Desnianskyi districts is also necessary to enhance the connectivity in the northern part of the city. This requires detailed design and careful selection of locations. Since these areas are already heavily built up, it is necessary to find optimal locations for creating green areas and in some cases, there is a need to look for alternative nature-based solutions.

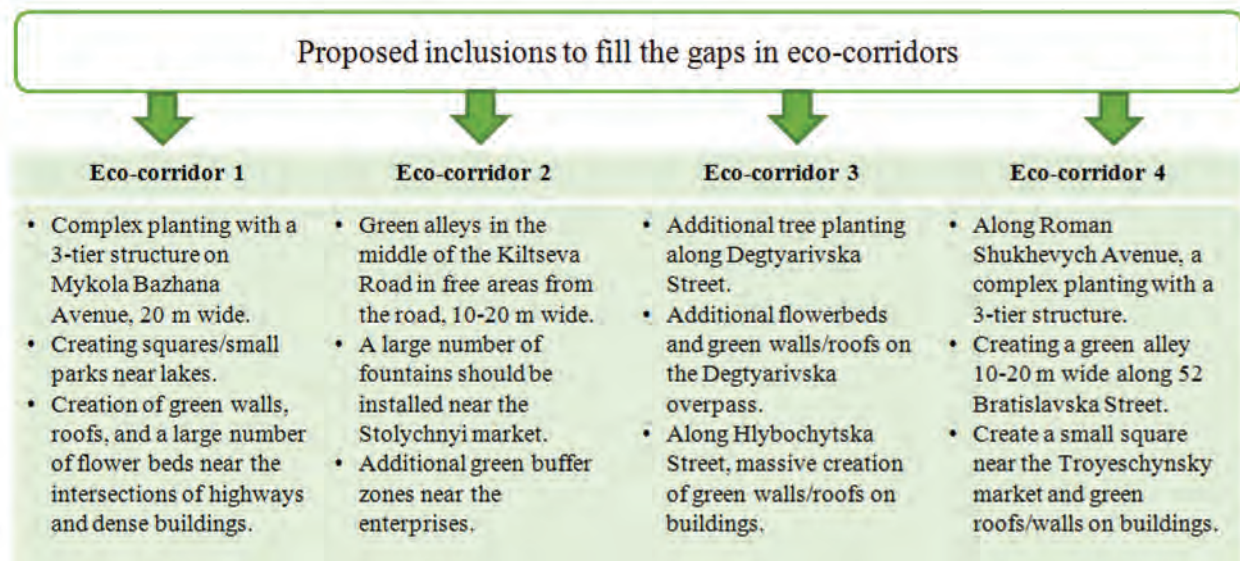


Fig. 2. Proposed inclusions to the eco-corridors

An important condition for the successful development of connectivity is prioritizing the planting of native trees, shrubs, and plants is essential for enhancing the ecological value of the corridor. Native vegetation provides essential habitat and food sources for local wildlife while promoting biodiversity and ecological resilience.

## Conclusions

The ecological networks in cities facilitate the migration and dispersal of species, ensure stability of ecosystem services, and preserve unique natural landscapes. They also contribute to mitigation of climate change effects, improve the quality of water and air resources, and maintain the recreational and aesthetic value of the territory. Experience from cities around the world offers diverse approaches to planning and building eco-networks successfully.

The ecological network development for Kyiv is of utmost importance for improving the environmental situation and the quality of life of its residents. Known for its rich green infrastructure, Kyiv ecosystems experience considerable pressure from anthropogenic impacts and growing fragmentation.

Four key eco-corridors were defined for the city to connect green areas with each other. Optimal sites for creating new green areas have been identified in Obolon and Desnianskyi districts, which

are intensively built up and require the integration of new green areas to form an ecological network. Suggested solutions also include a number of small-scale activities, such as ponds, green roofs and walls, squares, as well as more complicated structures, such as 3-tier plant association (grass cover, bushes, trees of the lower tier).

Successful implementation of these projects will contribute to the preservation and restoration of Kyiv's natural complexes, strengthening the city's environmental sustainability, improving air and water quality, and creating more comfortable living conditions for residents.

## References

1. Ings, T. C., & Hawes, J. E. (2018). The history of ecological networks. *Ecological Networks in the Tropics: An Integrative Overview of Species Interactions from Some of the Most Species-Rich Habitats on Earth*, 15-28. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68228-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68228-0_2)
2. Hilty, J.\*, Worboys, G.L., Keeley, A.\*, Woodley, S.\*, Lausche, B., Locke, H., Carr, M., Pulsford I., Pittock, J., White, J.W., Theobald, D.M., Levine, J., Reuling, M., Watson, J.E.M., Ament, R., and Tabor, G.M.\* (2020). Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. *Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 30*.

Gland, Switzerland: IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en>

3. Tabor, G. (2019). 'Ecological connectivity: A bridge to preserving biodiversity'. In *Frontiers 2018/19: Emerging Issues of Environmental Concern*. Nairobi: United Nations Environment Programme. Pp. 24-37. ISBN: 978-92-807-3737-0

4. Theodorou, P. (2022). The effects of urbanisation on ecological interactions. *Current Opinion in Insect Science*, 52, 100922. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100922>

5. Hudzevych, A. V., Nikitchenko, L. O., Hudzevych, L. S., Bronnikova, L. F., & Demets, R. O. (2021). Approaches to organize the econetwork of the Transnistria region in the conditions of urban landscape. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(3), 449-459. <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112141>

6. Huang, B.-X., Chiou, S.-C., & Li, W.-Y. (2021). Landscape Pattern and Ecological Network Structure in Urban Green Space Planning: A Case Study of Fuzhou City. *Land*, 10(8), 769. <https://doi.org/10.3390/land10080769>

7. Mahmoudzadeh, H., Masoudi, H., Jafari, F., Khorshiddoost, A. M., Abedini, A., & Mosavi, A. (2022). Ecological networks and corridors development in urban areas: An example of Tabriz, Iran. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 969266. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.969266>

8. Kim, D., Shin, W., Choi, H., Kim, J., & Song, Y. (2020). Estimation of ecological connectivity in a city based on land cover and urban habitat maps. *Sustainability*, 12(22), 9529. <https://doi.org/10.3390/su12229529>

9. Song, S., Xu, D., Hu, S., & Shi, M. (2021). Ecological Network Optimization in Urban Central District Based on Complex Network Theory: A Case Study with the Urban Central District of Harbin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1427. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041427>

10. Quimbayo Ruiz, G.A. (2018). People and ur-

ban nature: the environmentalization of social movements in Bogota. *Journal of political ecology: case studies in history and society*. 25, 525-547. <https://doi.org/10.2458/v25i1.23096>

11. Joshi, M., Rivière, L., Mahy, G., & Teller, J. (2021). Effectiveness of Green Roofs in Strengthening Ecological Network. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46. 51–54, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W1-2021-51-2021>.

12. Galchenko, N.P., Mudrak, O.V. (2021). Biodiversity centers as structural elements of the ecological network of the city of Kremenchuk. Ecologically balanced development of society: state, problems, prospects: scientific and methodological publication. – Vinnytsia: KZVO «Vinnytsia Academy of Continuing Education», 2021. P. 23-28.

13. Kazimirova L. P., Mironova N. G., Mateyuk O. P., Ilyinsky S. V. Nature Reserve Fund and Ecological Network of the City of Khmelnytsky and Their Role in Preserving Biotic and Landscape Diversity. *Scientific Reports of the National University of Sciences of Ukraine*, 4 (98). <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2022.04.004>

14. Denisyk, G. I., Yatsentiuk, Y. V., Vorovka, V. P., & Volovyk, V. N. (2021). Biocenters of the ecological network of the city of Vinnytsia. *Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Geology. Geography. Ecology»*, (54). P. 267-277. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-20>

15. Kuzyk, I. R., & Tsaryk, L. P. (2020). Geoecological assessment of the structure of the complex green zone of the city of Ternopil and its optimization. *Man and Environment. Problems of Neoecology*, (34), 8-18. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2020-34-01>

16. Koniakin, S. M., Burda, R. I., & Budzhak, V. V. (2024). The dynamics of the taxonomic composition of the alien fraction of the urban flora in the Kyiv urban area, Ukraine. *Environmental & Socio-economic Studies*, 12(2), 62-82. <https://doi.org/10.2478/environ-2024-0013>

UDC 504.06:631.41:662.75

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-11>

## IMPACT OF SPACE LAUNCHES ON THE ENVIRONMENT

Kotsiubynskyi A. O., Hrytsulyak H. M.,  
Yatsyshyn T. M., Lynnyk D. O.,  
Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

In the past, the environmental impact of the space industry has been overlooked. The main reason for this is the small number of large rocket launches per year. But today, the dynamics of growth in the number of launches is impressive - from 114 in 2018 to 222 space launch attempts (211 of which were successful) in 2023. The aim of the study is to assess the impact of space launches on the environment. Each launch of a large rocket brings not only great benefits, both scientific and practical, but also a significant amount of emissions. At the same time, different types of rockets have different environmental impacts. In addition to the impact of spent rocket stages and debris falling into remote areas, oceans, or densely populated areas, there is a negative impact on the atmosphere. All rockets use fossil fuels and emit carbon dioxide and water. But some types of engines are more environmentally acceptable than others. Current research shows that kerosene-fueled rockets and some types of hybrid engines emit significant amounts of black carbon. At the same time, the amount of black carbon emitted by such rockets is already comparable to the amount of soot emitted by the entire aviation industry. Rocket fuel residues contain toxic compounds that have a negative impact on the environment. Therefore, the development of environmentally friendly fuels, such as methane or hydrogen, is becoming increasingly important. Another type of impact on the atmosphere is the destruction of the ozone layer. High temperatures during rocket flight lead to the formation of large amounts of nitrogen oxides, which can destroy ozone in the stratosphere. The destruction of the ozone layer is a global environmental problem with serious consequences for the environment. The current state of the industry does not have a large-scale impact on climate change. However, looking to the future, the dynamics of the growth in the number of launches indicates the need for environmental regulation.

**Keywords:** Environment, ozone layer, emissions, air pollution, rocket engine

### Problem statement

The space industry is one of the fastest growing industries in the world today. Revenue from this industry is projected to grow from \$350 billion in 2019 to over \$1 trillion and is expected to reach \$2.7 trillion by 2045 [18].

This huge demand is due to many factors: lower launch costs due to commercialization, increasing dependence on satellite technology for GPS, surveillance, and broadband internet. The issue of the militarization of space remains open. In this regard, new space launch and rocket production centers are emerging around the world. In addition, 2021 can be considered the beginning of commercial spaceflight and space tourism [5]. Thus, the space industry is growing rapidly, but it also has a significant impact on the environment.

As the number of rocket launches grows annually, there is a need to adapt the regulatory system as the industry is subject to change. An increase in the number of launches can lead to an increase in negative environmental impact, in particular, even a small increase in the number of launches compared to current levels can have serious environmental consequences [6]. At the same time, the CEO of SpaceX said that the ultimate goal of Starship development is to launch up to three times a day, which is equivalent to about 1000 flights a year. Therefore, regulatory authorities should anticipate the negative consequences of such a number of launches and take appropriate action. The purpose of our work is an analysis of the assessment of the possible negative impact of space launches on the environment.

### **Analysis of the latest research and publications**

Space rocket launches have a significant impact on the environment in several key ways:

During rocket launches, various chemicals are released into the atmosphere, including aluminum oxide, hydrogen chloride, soot, and other compounds, depending on the type of fuel. These emissions can cause acid rain, increase the concentration of suspended particles in the air, and change weather conditions in the areas surrounding the launch sites. Particularly dangerous are soot emissions in the upper atmosphere, as they can persist for several years and have a significant greenhouse effect that is hundreds of times greater than the impact of similar emissions on the earth's surface.

Some combustion products of rocket fuel, such as nitrogen oxides and chlorine, can interact with the ozone layer, causing its destruction. This increases the level of ultraviolet radiation reaching the Earth's surface and can negatively affect human health and ecosystems.

In the areas where separating parts of missiles fall, soil contamination with rocket fuel residues and structural fragments is observed. This can lead to the accumulation of toxic substances in the soil, which can be absorbed by plants and, ultimately, by animals and humans. In addition, mechanical contamination by solid fragments can reduce crop yields [2].

Rocket fragments and inoperable satellites left in orbit create space debris that poses a threat to existing spacecraft and future missions. With the increasing number of launches, this problem is becoming more and more urgent. As of 2023, there are more than 23,000 objects of space debris larger than a softball in Earth's orbit, as well as more than 100 trillion untraceable smaller particles.

The use of nuclear power sources on spacecraft carries the risk of radioactive contamination in the event of accidents or uncontrolled reentry of such vehicles to Earth. This can cause significant damage to both the environment and human health [3].

The growing intensity of space activities requires the development and implementation of international standards and measures aimed at minimizing the negative impact on the environment. This includes the use of environmentally friendly fuels, the development of technologies to reduce

space debris, and effective management of the life cycle of spacecraft. It is also necessary to systematically monitor and assess environmental risks associated with space activities to ensure sustainable development and environmental protection.

### **Analysis of the latest research and publications**

A thorough analysis of scientific articles, technical reports and reviews covering the impact of various types of rocket fuel on the atmosphere, soil, water resources and the ozone layer was conducted. The main focus was on research on pollutant emissions, mechanisms of ozone depletion, and accumulation of toxic substances in soil and water. The sources used include the works of the authors [1, 2, 7, 8, 11, 16, 17].

The types of rocket fuel were systematized and classified, including solid, liquid, hybrid, and hydrogen. Each type of fuel was evaluated in terms of its chemical

To quantify the impact of launches, data on the number of launches in 2019 and associated emissions ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cl_2$ ) were used. The modeling results obtained from previous studies [15,12], made it possible to assess how emissions from launches affect the ozone layer and global climate.

The impact of chemical fuel residues and mechanical debris in the areas where rocket parts fall on soils and water bodies was analyzed. Particular attention is paid to spaceports in Kazakhstan, the United States, French Guiana, and other regions with high launch activity.

An analysis of the amount of space debris generated over the period 1957-2019 was carried out. The data was obtained from international databases and compared between the leading countries in terms of the number of launches [17].

Best practices and strategies for reducing the environmental impact of rocket launches, including the use of «green» hydrogen, the development of biofuels.

### **Determining the goals of the article (task statement)**

The aim of the study is to assess the environmental impact of space launches.

### Summary of the main research material

In just 40 years, rocket and space activities have created serious problems by polluting the earth's surface, atmosphere, and near-Earth space [17]. In this regard, it becomes extremely important to objectively assess all areas of negative impact of rocket and space activities.

The first obvious pollutant is space debris. Table 1 shows the countries that have been most active in space activities. Between 1957 and 2019, 5912 launches were carried out. The most active suppliers of space debris are Russia, the United States, and China, which account for 90.5% of all space debris [17].

Another environmental impact factor is emissions from rocket engines. Although modern engines

Table 1

Amount of space debris for the period from 1957 to 2019 by country

№	Countries, regions	Number of polluting objects space
1	Russia	6075
2	USA	4867
3	China	3623
4	Europe	367
5	India	174
6	Japan	183
7	Other countries	605
	<b>Total:</b>	<b>16094</b>

Table 2

Types of rocket engines in use today

Engine type	Fuel	Advantages	Disadvantages
Liquid rocket engines	Liquid fuel (hydrogen, oxygen, kerosene, liquid nitrogen) and oxidizer	High traction, high efficiency, possibility of adjustment of traction	Complexity, high cost
Solid rocket engines	Solid fuel (based on polyurethane or nitrocellulose)	Simplicity, reliability, low cost	Low traction, inability to adjust traction
Hybrid rocket engines	Liquid fuel and solid oxidizer	Combines the advantages of RRD and TRTD: high traction, reliability, adjustable traction	Complexity, high cost
Nuclear rocket engines	Nuclear fuel (uranium rod)	Potentially the highest thrust, the ability to fly long distances	Very difficult, expensive, dangerous, ethical issues

are capable of operating with high efficiency in converting fuel energy into thrust, they are extremely inefficient from an environmental point of view [9]. Toxic rocket fuel has a catastrophic impact on the environment. It pollutes the upper atmosphere, where the accumulation of combustion by-products leads to the loss of the ozone layer [3]. Table 2 shows the different types of engines in use today.

Most of the air pollution comes from the propellant and oxidizer used in the various stages of a rocket launch. The four main classes of rocket fuel that are most commonly used include kerosene, hyperbolic fuel, liquid hydrogen (cryogenic), and solid fuel [14]. The combustion of these fuels releases various pollutants into the atmosphere, such as water vapor, nitrogen oxides, black carbon, and particulate matter. It is important to note that these pollutants also contribute to the depletion of the ozone layer through gas-phase reactions or activation of chlorine in the atmosphere [13].

Figure 1 shows the locations of all 127 documented rocket launches in 2019, dominated by China (34 launches), Kazakhstan (22), Russia (22), and US-led launches in the United States (21) and New Zealand (6).

Others include launches by the European Space Agency (ESA) from French Guiana (9), Iran (5), and launches in India (6) and Japan (2) by their respective space agencies. Shares by weight of the four main fuels (kerosene, hypergolic, liquid hydrogen, and solid propellants) used in each country [15].

Solid propellants dominate launches from Japan, India, and French Guiana. Hypergolic fuels are typical for China, Kazakhstan, and Iran. Kerosene is the dominant fuel for launches in New Zealand, Russia, and the United States. The total amount of rocket fuel used in 2019 was 32 Gg and included 45% kerosene, 32% hypergolic, 14% solid and 8% liquid hydrogen [10].

Figure 2 shows the mass of each pollutant emitted in 2019 within the model's altitude range. This includes the combustion of fuel in the booster and first stage of the rocket, as well as from re-entry heating. The relative mass of each emitted component is the same for each month. Emissions from the booster and first stage of the rocket, which occur within the altitude limits of GEOS-Chem, account for the majority of total emissions from all stages: 80% for NO<sub>x</sub>, 94% for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HCl + Cl, 84% for H<sub>2</sub>O and

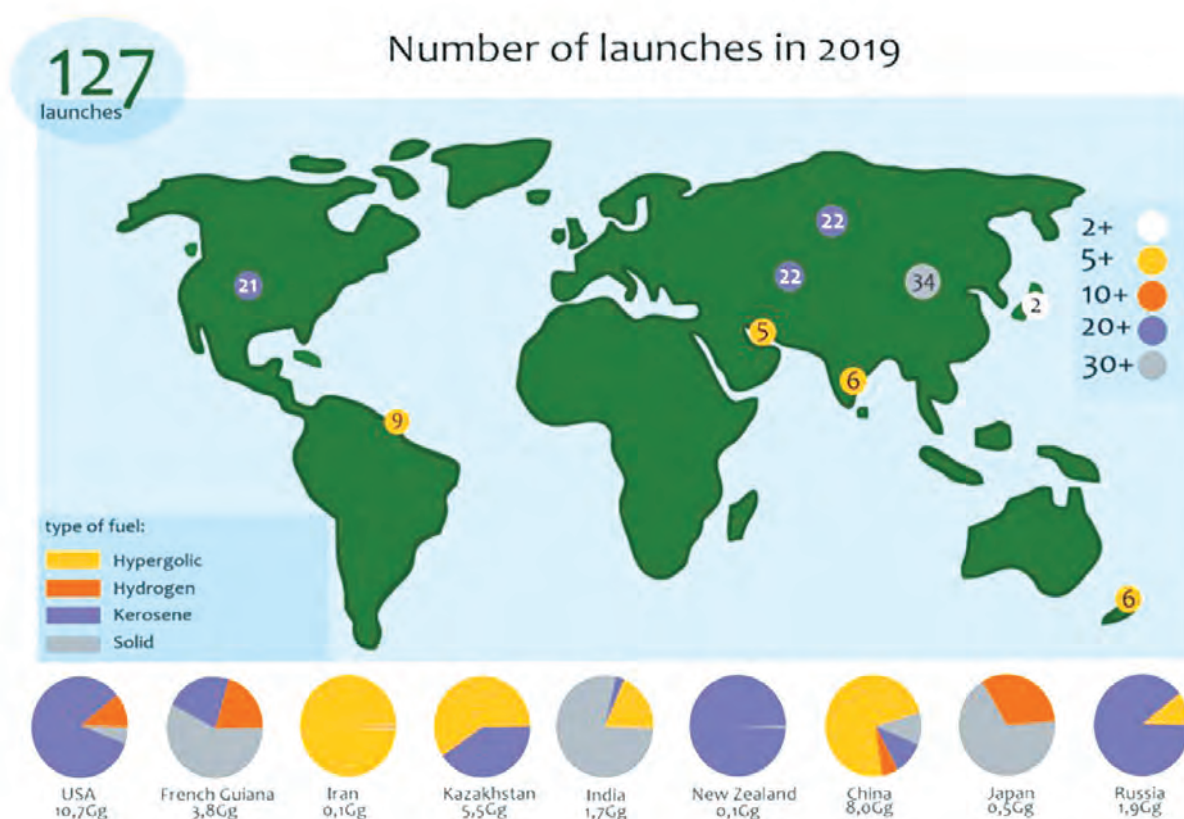


Figure 1. Locations of rocket launches in 2019 and pie charts.

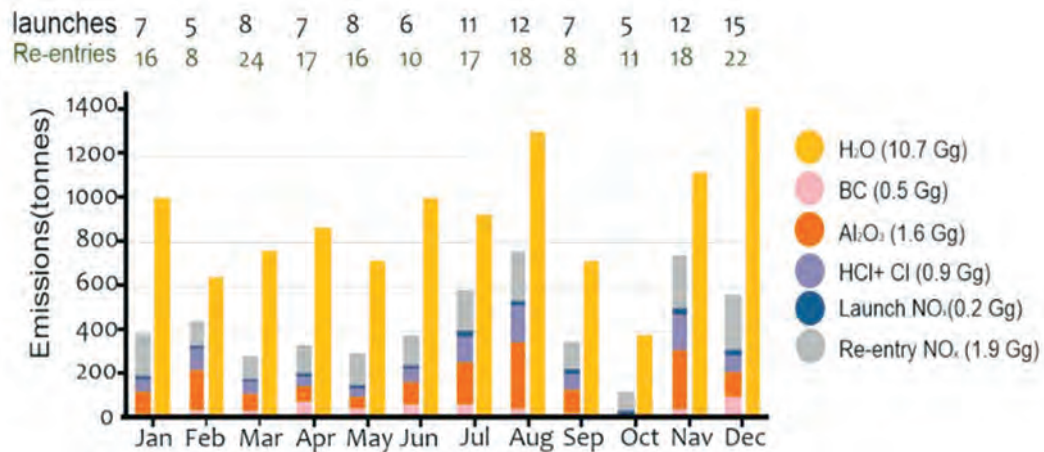


Figure 2. Mass of pollutants emitted in 2019 in the world

79% for BC. The amount of emissions above 15 km is 78%-79% for H<sub>2</sub>O and BC, and 68%-69% for Cl and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [12].

Different types of fuels have different environmental impacts, depending on their chemical composition and combustion processes.

Solid propellants, which are commonly used in rockets, have a significant negative impact on the environment. Its combustion is accompanied by emissions of greenhouse gases such as CO<sub>2</sub> and particulate matter, and emissions of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and chlorine oxides (HCl) contribute to the destruction of the ozone layer and the formation of acid rain [7].

Liquid fuels, such as kerosene, jet fuel, or liquid hydrogen, have a lower environmental impact. It produces fewer greenhouse gases than solid fuels, but it can still pollute the atmosphere with particulate matter. There is also a risk of liquid fuel leakage, which can lead to serious soil and water pollution [1].

Hybrid fuels, which combine elements of solid and liquid fuels, have a lower environmental impact because they produce fewer greenhouse gases and particulate matter. However, chemical washout from rocket launch sites, noise, and debris from launches can still have a negative impact on the environment [8].

Hydrogen is considered to be one of the most environmentally friendly rocket fuels because it does not generate greenhouse gases during combustion. However, hydrogen production can have a negative impact on the environment, depending on the method used. Speaking of green hydrogen, it is the only type of fuel that has an environmental perspective [16].

While solid propellants are efficient for certain

types of rockets due to their stability and high energy density, their combustion significantly contributes to environmental degradation. Besides the direct emission of greenhouse gases (GHG) such as CO<sub>2</sub>, the particulate matter released during combustion can contribute to air pollution and climate change. Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and chlorine-based compounds like HCl from solid propellants are particularly damaging to the ozone layer, accelerating its depletion. The accumulation of these pollutants can also lead to regional ecological disturbances, including acidification of soils and water bodies.

Liquid fuels, including kerosene and liquid hydrogen, are widely used due to their relatively lower GHG emissions compared to solid fuels. However, the environmental risks associated with liquid fuels primarily stem from their handling and storage. Leakage of these fuels into the environment can lead to soil contamination and water pollution, severely impacting local ecosystems. For instance, kerosene spillages can destroy vegetation and aquatic life due to its toxicity. Moreover, while liquid hydrogen combustion produces water vapor, its production process, often reliant on fossil fuels, can result in significant GHG emissions unless green hydrogen methods are employed. Hybrid rocket fuels, which utilize a combination of solid and liquid components, represent a middle ground in terms of environmental impact. These fuels offer reduced GHG emissions compared to solid fuels and generate less particulate matter. Despite this advantage, the environmental consequences of hybrid fuel usage are not entirely negligible. Noise pollution from launches, chemical runoff from fueling stations, and debris from rocket

components can disrupt local biodiversity and ecosystems near launch sites [9].

Hydrogen, especially green hydrogen derived from renewable energy sources, holds great promise as a sustainable rocket fuel. During combustion, hydrogen produces only water vapor, making it a clean alternative to traditional fuels. However, the environmental footprint of hydrogen depends heavily on its production method.

Conventional hydrogen production through steam methane reforming generates considerable CO<sub>2</sub> emissions unless carbon capture technologies are employed. On the other hand, green hydrogen, produced through electrolysis powered by renewable energy, offers a truly sustainable and environmentally friendly option. Nonetheless, challenges such as storage, transportation, and the high cost of production need to be addressed for broader adoption in the aerospace industry.

Regardless of the type of fuel used, space launches have several secondary environmental impacts. These include: the intense heat generated during launches can damage nearby vegetation and soil, while shock waves can disrupt wildlife and ecosystems; residual fuels and oxidizers can contaminate soil and water around launch sites; the proliferation of space debris from launches poses a long-term challenge, not only for future space missions but also for atmospheric re-entry, which can release toxic substances; rocket launches generate extreme levels of noise, which can disrupt human and animal populations in the vicinity.

Future Directions to mitigate the environmental impacts of rocket launches, research and development efforts are focusing on: developing cleaner fuels, such as bio-derived rocket fuels or advanced forms of green hydrogen; improving the efficiency of rocket engines to minimize fuel consumption and emissions; implementing stricter environmental regulations for rocket manufacturing, fuel production, and launch site management; investing in technologies to capture and neutralize emissions at launch sites; designing reusable rockets to reduce waste and debris associated with single-use components.

The transition toward more sustainable space exploration practices is critical to balancing humanity's scientific ambitions with the responsibility to protect Earth's environment.

Destruction of the ozone layer and its connection with the flight of large rockets. The Earth's ozone

layer, located in the stratosphere, protects us from the sun's harmful ultraviolet (UV) radiation. This layer consists of ozone (O<sub>3</sub>), which is destroyed by active catalysts such as nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), chlorine oxides (Cl<sub>x</sub>), bromine oxides (Br<sub>x</sub>), and hydroxyl radicals (OH) [11]. The exhaust gases from rocket launches, regardless of the type of fuel (Fig. 2), contain NO<sub>x</sub>, OH and H<sub>2</sub>O, which also destroy ozone. Ozone loss can be localized, within the exhaust plume, or global, reducing the ozone concentration in the entire ozone layer [17].

In general, the impact of different catalysts on ozone depletion can be distinguished. NO<sub>x</sub>: Catalytically destroys ozone molecules in the stratosphere. Sources: launch vehicles (mainly Russian and Chinese), airplanes (UDMH/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Impact: 10 Proton launches: 0.00012% annual ozone reduction. Actual losses (2000-2009): 0,00016%. Largest contributors: Russian and Chinese missiles. Contribution of the US Air Force: insignificant (0.0000005%) [2].

Cl<sub>x</sub>: Catalytically destroy ozone molecules in the stratosphere. Sources: Solid rocket engines (mostly perchlorate-based). Impact: 816 tons of Cl<sub>x</sub> annually: 0.052% of annual ozone decrease at 60°N, 0.017% at 30°N. Actual losses (over 20 years): 0.14%. Largest contributor: US missiles (23.5% over 20 years). Contribution of the US Air Force after 2003: 5,4%. Future projections: 0.0004(3) % annual ozone decrease [1]. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Photochemical process: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reacts with chlorine to form Cl<sub>x</sub>. Sources: Solid rocket engines. Impact: 1120 tons of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> annually: 0.004% annual ozone depletion. Actual losses (over 10 years): 0.004%. Contribution of the US Air Force: 0,0005% (2006-2008) [14]. H<sub>2</sub>O: Negligible impact, indirectly through NO<sub>x</sub>. Sources: launch vehicles (mainly Proton). Impact: 628 tons of H<sub>2</sub>O annually: 0.00001% annual ozone reduction. Although the impact of some substances, such as H<sub>2</sub>O, may be negligible, the overall impact of rocket launches on the ozone layer needs to be carefully studied and monitored. [2].

Conclusions and prospects for further research. Space exploration has become a milestone in human history, providing access to satellite maps, television, and other technologies that are now an integral part of our lives. However, the development of the space industry has significant environmental consequences that require immediate attention. Every space launch

is accompanied by emissions of pollutants that have a negative impact on the environment, including ozone depletion, climate change, acid rain, and an increase in space debris.

Research shows that the growing number of space launches increases emissions of black carbon, nitrogen oxides, water vapor, and other pollutants that contribute to ozone depletion and global climate change. Particularly dangerous are solid fuel and kerosene rockets, which produce high levels of pollution and have a significant impact on the environment. In addition, the accumulation of space debris poses additional risks to the Earth's ecosystem and the functioning of spacecraft.

Ozone depletion and climate change pose a serious threat to human life on Earth. The consequences of these phenomena can be unpredictable, including an increase in the level of ultraviolet radiation, which negatively affects human health, agriculture and ecosystems in general. Therefore, there is an urgent need to develop strategies aimed at reducing the negative impact of space activities.

The main measures to minimize environmental risks are: development of more environmentally friendly rocket engines, in particular based on «green» hydrogen, which does not produce greenhouse gases; reducing the frequency of launches by optimizing launches and commercializing space technologies; implementing strict regulatory standards to limit emissions and monitor their environmental impact; investing in research into methods to restore the ozone layer and combat climate change.

Sustainable development of the space industry is possible only if environmentally friendly approaches are integrated into all aspects of its operation. Implementation of such measures will not only minimize the environmental impact of space launches, but will also help preserve the Earth's ecosystem for future generations.

## References

1. Casiano M. J., Hulka J. R., Yang V. Liquid-Propellant Rocket Engine Throttling: A Comprehensive Review // *Journal of Propulsion and Power*. 2010. Vol. 26, No. 5. P. 897–923. DOI: 10.2514/1.49791.
2. Dallas J. A., Raval S., Gaitan J. A., Saydam S., Dempster A. G. The Environmental Impact of Emissions from Space Launches: A Comprehensive Review // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 255. P. 120209. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120209.
3. Emrich Jr W. J. Principles of Nuclear Rocket Propulsion. Elsevier, 2023. DOI: 10.1016/C2015-0-06198-0.
4. Glibovytska N. I., Yatsyshyn T. M., Gritsylak G. M. Application of Environmental Biomonitoring in Environmental Risk Management of the Fuel and Energy Complex // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 1254, No. 1. P. 012111. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012111.
5. Go H., Kang M. Metaverse Tourism for Sustainable Tourism Development: Tourism Agenda 2030 // *Tourism Review*. 2023. Vol. 78, No. 2. P. 381–394. DOI: 10.1108/TR-03-2022-0123.
6. Grewal S. S. Towards a Martian Vernacular: Closed-Worlds and Infrastructures of Social Connectivity : Doctoral dissertation. Carleton University, 2022. DOI: 10.22215/etd/2022-14512.
7. Kalyon D. M., Yaras P., Aral B., Yilmazer U. Rheological Behavior of a Concentrated Suspension: A Solid Rocket Fuel Simulant // *Journal of Rheology*. 1993. Vol. 37, No. 1. P. 35–53. DOI: 10.1122/1.550401.
8. Karabeyoglu M., Cantwell B., Altman D. Development and Testing of Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels // 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2001. P. 4503. DOI: 10.2514/6.2001-4503.
9. Kushnirenko A. G., Stamov L. I., Tyurenkova V. V., Smirnova M. N., Mikhilchenko E. V. Three-Dimensional Numerical Modeling of a Rocket Engine with Solid Fuel // *Acta Astronautica*. 2021. Vol. 181. P. 544–551. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.01.011.
10. Pang F., Qin Y., Li H., Teng Y., Gong Q., Wang S. Study on Impact Resistance of Composite Rocket Launcher // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2021. Vol. 60, No. 1. P. 615–630. DOI: 10.1515/rams-2021-0045.
11. Parson E. A. Protecting the Ozone Layer: Science and Strategy. Oxford: Oxford University Press, 2003. DOI: 10.1093/0195155491.001.0001.
12. Popp P. J., Ridley B. A., Neuman J. A., Avalone L. M., Toohey D. W., Zittel P. F., Danilin M. Y. The Emission and Chemistry of Reactive Nitrogen Species in the Plume of an Athena II Solid-Fuel Rocket Motor // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29, No. 18. P. 34-1. DOI: 10.1029/2002GL014810.
13. Ross M., Toohey D., Peinemann M., Ross P. Limits on the Space Launch Market Related to Strato-

spheric Ozone Depletion // *Astropolitics*. 2009. Vol. 7, No. 1. P. 50–82. DOI: 10.1080/14777620902768867.

14. Ross M., Vedula J. The Policy and Science of Rocket Emissions. Center for Space and Policy Strategy, 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.36492.62088.

15. Ryan R. G., Marais E. A., Balhatchet C. J., Eastham S. D. Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions on Stratospheric Ozone and Global Climate // *Earth's Future*. 2022. Vol. 10, No. 6. P. e2021EF002612. DOI: 10.1029/2021EF002612.

16. Silvera I. F., Cole J. W. Metallic Hydrogen: The Most Powerful Rocket Fuel Yet to Exist // *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 215, No. 1. P. 012194. DOI: 10.1088/1742-6596/215/1/012194.

17. Sirieys E., Gentgen C., Jain A., Milton J., Weck

O. Space Sustainability Isn't Just About Space Debris: On the Atmospheric Impact of Space Launches // *MIT Science Policy Review*. 2022. Vol. 3. P. 143–151. DOI: 10.38105/spr.15.1.

18. Spector S., Higham J. E., Gössling S. Extraterrestrial Transitions: Desirable Transport Futures on Earth and in Outer Space // *Energy Research & Social Science*. 2020. Vol. 68. P. 101541. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101541.

19. Yatsyshyn T. Global climate changes: factors of intensification and methods of their detection // Book of Abstracts of the 6th KGK Space Resources Conference, May 15-16, 2023. Krakow: AGH University of Krakow, 2023. P. 32. URL: <http://www.kgk.agh.edu.pl/wp-content/uploads/2023/06/KGK2023-Book-of-abstracts.pdf>.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ОХОЛОДЖУВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ РЕАКТОРА ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗУ

Маркіна Л. М., доктор технічних наук, професор  
Іващенко Т. Г., доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
Власенко О. В., науковий співробітник, аспірант  
Державна екологічна академія післядипломної освіти  
та управління, м. Київ  
*email: olegvvvv@gmail.com*

### Анотація

Стаття присвячена розробці та аналізу моделей процесів теплообміну в охолоджувальній системі реактора циркуляційного піролізу, що є ключовим елементом для забезпечення ефективної та безпечної роботи піролізних установок. Охолодження реактора в даному контексті відіграє важливу роль у запобіганні перегріву робочих компонентів, зниженні енергетичних втрат та забезпеченні стабільності піролізного процесу. В роботі розглянуто фізичні основи теплопередачі в охолоджувальних системах, що включають конвекцію, теплопровідність та радіаційний теплообмін.

Окремо звертається увага на методи математичного моделювання, що дозволяють точно описати та прогнозувати теплові процеси в реакторі, враховуючи змінні параметри середовища, наприклад, температуру, швидкість потоку охолоджувальної рідини та теплофізичні властивості матеріалів. У статті також представлено аналіз впливу різних факторів, таких як температура та тиск, на ефективність охолодження, що дозволяє оптимізувати роботу системи та підвищити її надійність.

Розроблені моделі застосовуються для визначення температурних режимів в різних частинах реактора та охолоджувальної системи, а також для оптимізації розподілу тепла між різними елементами системи. Моделювання процесів те-

плообміну дозволяє не тільки забезпечити стабільну роботу піролізного реактора, а й знизити енергетичні витрати, що є важливим аспектом у контексті сучасних вимог до енергетичної ефективності промислових процесів.

Використання запропонованих математичних моделей дозволяє отримати важливі параметри для проектування та налаштування охолоджувальних систем, а також для підвищення їх енергоефективності та безпеки в процесі експлуатації. Стаття має практичне значення для інженерів та науковців, що займаються проектуванням та експлуатацією піролізних установок і теплотехнічних систем, а також для тих, хто розробляє нові технології з переробки органічних матеріалів.

**Ключові слова:** циркуляційний піроліз, багатоконтурна циркуляційна система, моделювання та розрахунок, рівноважний стан, теплообмін, технологічні параметри.

### Abstract

The article is devoted to the development and analysis of models of heat exchange processes in the cooling system of a circulating pyrolysis reactor, which is a key element for ensuring the efficient and safe operation of pyrolysis plants. In this context, reactor cooling plays an important role in preventing overheating of working components, reducing energy losses and ensuring the stability of the pyrolysis process. The paper discusses the physical

foundations of heat transfer in cooling systems, including convection, thermal conductivity and radiative heat transfer.

Special attention is paid to mathematical modeling methods that allow you to accurately describe and predict thermal processes in the reactor, taking into account variable parameters of the environment, for example, temperature, coolant flow rate and thermophysical properties of materials. The article also presents an analysis of the impact of various factors, such as temperature and pressure, on cooling efficiency, which allows you to optimize the operation of the system and increase its reliability.

The developed models are used to determine temperature conditions in different parts of the reactor and cooling system, as well as to optimize the distribution of heat between different elements of the system. Simulation of heat exchange processes allows not only to ensure the stable operation of the pyrolysis reactor, but also to reduce energy costs, which is an important aspect in the context of modern requirements for energy efficiency of industrial processes.

The use of the proposed mathematical models allows you to obtain important parameters for the design and adjustment of cooling systems, as well as for improving their energy efficiency and safety during operation. The article is of practical importance for engineers and scientists involved in the design and operation of pyrolysis plants and thermal engineering systems, as well as for those who develop new technologies for the processing of organic materials.

**Keywords:** circulating pyrolysis, multi-circuit circulation system, modeling and calculation, equilibrium state, heat transfer, technological parameters.

### Постановка проблеми

Основними конструктивними блоками установок багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП), є реактор і система циркуляційного охолодження, додаткової деструкції та стабілізації парогазової суміші вуглеводнів. В результаті розрахунку та моделювання має бути визначена площа теплообміну, що забезпечує задану міру перетворення сировини за певний час. При цьо-

му необхідно враховувати обмеження по допустимій температурі матеріалу стінок реактора. Димові гази, що відходять, повинні мати мінімально низьку температуру перед викидом їх в димар, це пов'язано з ефективним використанням спалюваного палива та можливості застосування когенераційних процесів [3]. З цією метою в установках передбачається конвекційна зона, де реактор нагрівається за рахунок тепла димових газів та зона повернення та циркуляції частини парогазової суміші до реактора для повторної деструкції.

### Мета

Моделювання та розрахунок процесів теплообміну в охолоджувальній системі реактора циркуляційного піролізу для визначення числа контурів та геометричні параметри у багатоконтурній циркуляційній системі, визначення основних показників процесів деструкції важких рідких продуктів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Існує декілька моделей і методик розрахунку конвективного теплопереносу, що використовують різну міру деталізації. Визначення мінімального числа контурів можна виконати за методом Мак Кеба Тіле та метод Поншона – Саварі [4]. Як найповнішим, є метод ділення газоходу за ступенями. При його використанні весь об'єм газоходу розбивають на ділянки (зони) і враховують теплообмін на кожній з них. За простою моделлю теплопередачі приймається постійна температура в газоході однієї ступені і середня температура стінки реактора другої ступені [10].

Зонний метод дозволяє дуже точно і з врахуванням всіх чинників визначити температуру в будь-яких точках усередині газоходу. Проте він вельми громіздкий, вимагає великого числа ітерацій і не має істотних переваг перед простішими моделями, які дають близькі за значенням результати. Крім того, при порівнянні результатів розрахунку з експериментом ніколи не відома точна витрата палива пальників [13]. А при різних витратах палива температури по зонах знач-

но різняться. Використання середніх температур димових газів, що відходять, і температур стінки для розрахунку – дуже грубе наближення.

### Виклад основного матеріалу

Щоб забезпечити селективне відділення важкої рідкої фази (ВРФ) від парогазової суміші (ПГС), необхідно мати відповідне число контурів у багатоконтурній циркуляційній системі (БЦС). Для цього треба змодельювати, розрахувати теоретично число контурів, виходячи з мінімальної молекулярної маси 200 для вихідної ПГС.

Теоретично кожен контур МЦС (рис. 1) представляє ідеальний теплообмінник, що формує стан і структуру потоків ПГС і ВРФ, що задовольняють наступним вимогам:

1. Потіки ПГС і ВРФ, що виходять з контактної зони, перебувають у стані рівноваги.
2. Потік парогазової суміші (ПГС), що надходить контактну зону в поперечному перерізі, має однаковий склад і швидкість.
3. У межах контактної зони ВРФ має однакову молекулярну масу з контактної зони ВРФ, що виходить.

Розрахунок реактора з газоходом ведеться, фактично, завжди в перевірочному варіанті, тобто заздалегідь вибирають їх конфігурацію. Крім того, зазвичай задаються температурою, при якій сировина потрапляє в реактор. Теплопідвід до реактора здійснюється головним чином за рахунок конвекції.

У загальному вигляді блок-схема розрахунку реактора багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП) показана на рисунку 2.

Спочатку задаються вихідні дані для розрахунку (блок 1): розподіл сировини і її температури, склад суміші сировини і палива; конфігурація реактора (послідовність розташування контурів відносно руху димових газів); розмір, задана температура димових газів, що поступають в димар і так далі. Крім того, додатково задаються деякими величинами, які перевіряють в ході рахунку (блок 2).

Залежно від використовуваної методики розрахунку конвективного перенесення тепла до корпусу реактора проводиться розподіл реактора, поверхонь і об'ємів газоходу на ділянки (по ступеням) (блок 3). Далі проводиться розрахунок горіння палива (блок 4).

Для розрахунку теплопередачі усередині реактора мають бути визначені теплофізичні властивості ПГС в реакторі (блок 5). Щільність ПГС розраховують по складу, вважаючи його ідеальним газом. Теплоємність і в'язкість беруться з літератури або розраховуються за відомими методиками [1].

Після, проводиться розрахунок теплообміну в реакторі (блок 6). У зв'язку з тим, що по довжині реактора температура, тиск, склад сировини і інші параметри змінюються, розрахунок його зазвичай ведуть окремо по кожній ділянці.

Розміри останніх вибирають такими, щоб можна було нехтувати зміною умов усередині цих ділянок.

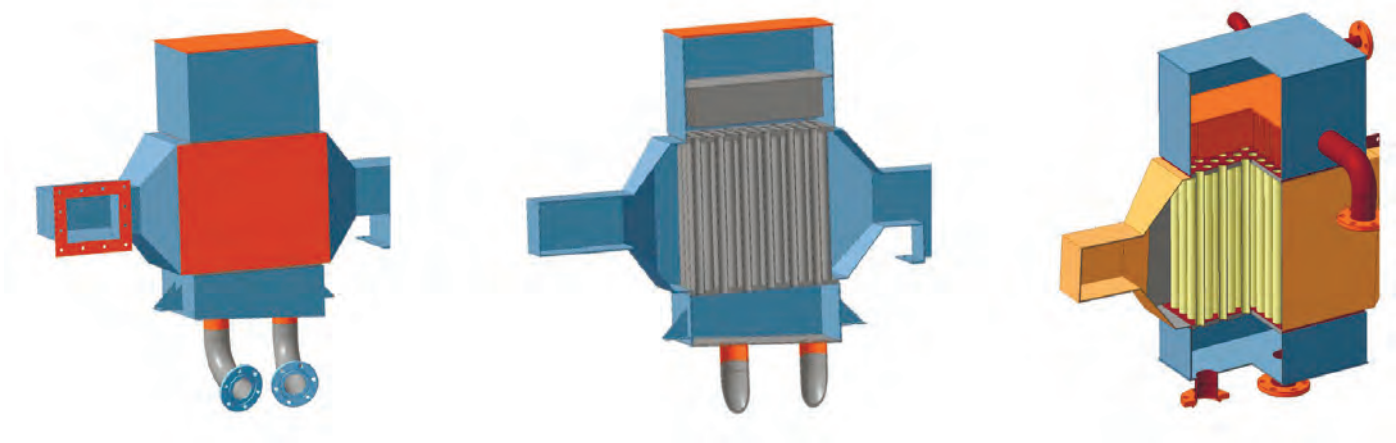


Рисунок 1. Комп'ютерне 3D зображення багатоконтурної циркуляційної системи

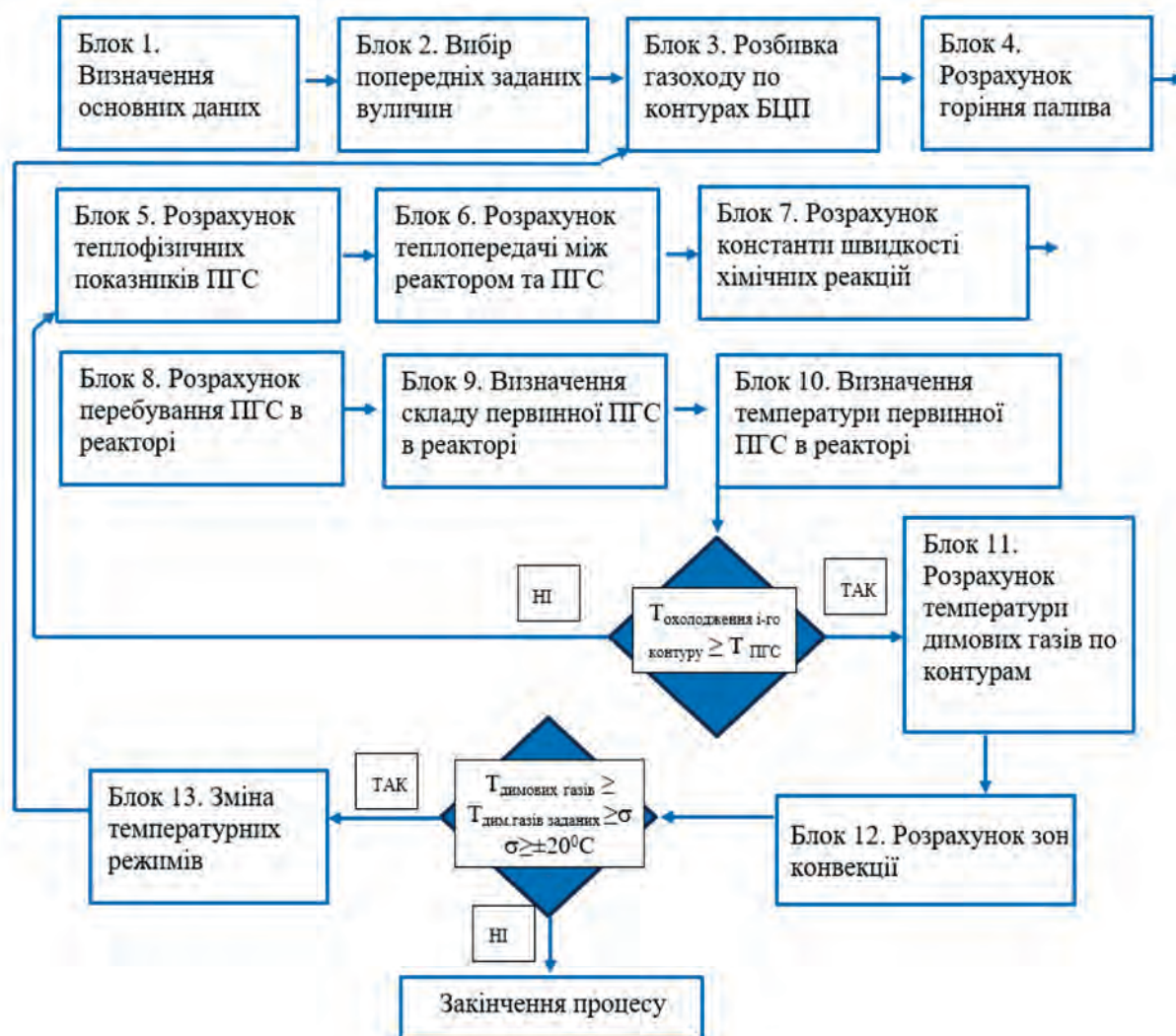


Рисунок 2. Блок-схема алгоритму розрахунку реактора БЦП [2]

У блоці 7 виконується перерахунок констант швидкостей хімічних реакцій при зміні температури сировини. По відомих витратах сировини, його складу, тиску і температурі розраховують час перебування сировини в ділянці реактора (блок 8).

По відомих константах швидкостей реакції і часу перебування потоку в ділянці реактора знаходиться зміна складу сировини в ній (блок 9). Церобиться шляхом інтеграції системи кінетичних рівнянь, яка є складовою частиною програми. По зміні складу потоку визначається потрібне для цього тепло. Виходячи з теплопереносу конвекції до поверхні реактора і тепловіддачі від неї до сировини усередині реактора, обчислюють теплонапруженість і температуру поверхні реактора, а також температуру

сировини на виході з ділянки (блок 10). У зв'язку з нерівномірністю обігріву реактора важливо знати максимальні температури його поверхні. Для цього слід враховувати коефіцієнт нерівномірності прогрівання, а також теплопровідність і товщину відкладень нагару на зовнішній поверхні реактора і твердого залишку всередині реактора.

Послідовність розрахунків з використанням блоків 5–10 повторюють по числу ділянок із зміною температури на вході в кожен з них, поки не буде прораховано увесь реактор. Після цього в блоці 11 визначається температура димових газів на границі зон.

Після розрахунку кожній конвекційній зоні перевіряють температуру димового газу: якщо вона стає менше заданої величини для входу в димар,

то рахунок зупиняється; збільшують витрату палива в реактор і розрахунок повторюють із самого початку. В кінці рахунку також порівнюють розраховану і задану температури димових газів. Узгодження цих величин з точністю  $\pm 20^\circ\text{C}$  може вважатися достатнім.

Розрахунок опору газоходу по тракту димового газу і необхідної висоти димаря зроблений за відомими методиками [9].

Описаний вище алгоритм розрахунку дещо видозмінюється залежно від поставлених завдань. Так, приведена послідовність розрахунку конвекційних секцій відповідає «проектному» варіанту, тобто коли визначається необхідна поверхня теплопередачі. Коли поверхня задана (так званий, «перевірочний» варіант), то шукається температура потоку ПГС, що нагрівається. При цьому секція розраховується ітераційно, оскільки невідомі температури, до яких нагріється потік в трубах циркуляційної системи і охолоджуються димові гази. Окремим випадком є розрахунок реактора за температурою його стінки.

Оскільки, з одного боку, витрата палива по пристроях пальників ніколи не вимірюється, а з іншою, температуру поверхні реактора можна виміряти з чималою точністю ( $\pm 10\text{--}15^\circ\text{C}$ ), такі розрахунки дозволяють надійно визначити зміну температури по довжині реактора. Отримані результати показують, що зміни температури стінки на  $10\text{--}15^\circ\text{C}$  слабо впливають на температуру сировини, тоді як невелика довільна зміна профілю температури потоку може привести до абсолютно нереальних розрахункових температур стінки.

### Принцип роботи контурів установки

Первинну парогазову суміш, отриману в реакторі, піддають послідовному багатоступеневому охолодженню з пониженням температури кожної ступені, починаючи з початкової температури ПГС, на  $70\text{--}100^\circ\text{C}$ , отриману на кожній ступені рідку фракцію окремих компонентів парогазової суміші повертають самопливом у реактор, забезпечуючи сполучення первинного піролізу відходів з повторним піролізом окремих компонентів ПГС, а залишену частину ПГС направляють на наступну ступінь охолодження.

Для подальших розрахунків необхідно визна-

чити кількість контурів установки та температуру ПГС на вході до контуру та на виході з нього.

**Розрахунок кількості контурів та їх температур.** Для заданого складу органічних побутових відходів експериментальним шляхом знаходиться максимальна температура реактора  $t_{max\ p}$  (наприклад, для відходів, що мають рівні кількості різних полімерів вона становить  $600\text{--}650^\circ\text{C}$ , при цьому температура ПГС буде  $450\text{--}500^\circ\text{C}$ ).

Відповідно до цього розраховується кількість ступенів охолодження:

$$N_{\text{контуров}} = \frac{t_{\text{вхпгс}} - t_{\text{пгсвих}}}{\Delta t},$$

де  $t_{\text{пгсвих}}$  – температура кінцевої ступені,

$t_{\text{вхпгс}}$  – початкова температура ПГС,

$\Delta t = (70\text{--}100)^\circ\text{C}$  – температура охолодження ступені.

Далі розраховуються температури ПГС на вході та виході для кожної ступені:  $t_{1\text{вх}} = t_{\text{вхпгс}}$ ,

$$t_{1\text{вих}} = t_{1\text{вх}} - \Delta t, t_{2\text{вх}} = t_{1\text{вих}}, t_{2\text{вих}} = t_{2\text{вх}} - \Delta t$$

всі останні температури розраховуються аналогічно.

Температуру заданого рівня реактора повернення рідкої фракції можна розрахувати за формулою:

$$t_{\text{рів1}} = t_{max\ p} - t_{1\text{вих}}, t_{\text{рів2}} = t_{max\ p} - t_{2\text{вих}},$$

всі останні температури розраховуються аналогічно [3].

Теплообмінні поверхні контурів піролізної установки виконані у вигляді пластинчатих поверхонь, між якими організований протитечійний рух теплоносіїв. Тому подальші розрахунки ведуться за методикою для розрахунку пластинчатих теплообмінних апаратів.

Закономірності теплообмінних та гідравлічних процесів в каналах теплообмінних елементів вузько спеціалізовані на відміну від аналогічних залежностей для трубчатих теплообмінних поверхонь. Ймовірно, можливий перенос розроблених методик на елементи інших теплообмінних поверхонь, які конструктивно відрізняються від даної, при точному дотриманні принципів геометричної та гідродинамічної подібності. Розрахунок теплообміну в контурі ґрунтується на базових рівняннях теплового балансу, теплопередачі,

Таблиця 1

При проектному розрахунку використовують:

Вихідні дані:	Геометричні розміри системи охолодження циркуляційної системи та руху димових газів:
Масова витрата повітря $G_{пов}$ , кг/с Масова витрата ПГС $G_{пгс}$ , кг/с Вхідна температура та тиск повітря $t_{1пов}$ , °C, $p_{1пов}$ , Па Вхідна температура та тиск ПГС $t_{1пгс}$ , °C, $p_{1пгс}$ , Па Вихідна температура ПГС $t_{2пгс}$ , °C Сума відносних втрат тиску по трактам : $\delta P$	Довжина $L_{пгс}$ , м Ширина $b$ , м Товщина листа $\delta_l$ , м Прохідний переріз каналів повітря $S_{пов}$ , м <sup>2</sup> Прохідний переріз каналів для ПГС $S_{пгс}$ , м <sup>2</sup> Периметр каналів повітря $\Pi_{пов}$ , м Периметр каналів ПГС $\Pi_{пгс}$ , м Крок каналів по ширині листа $S_1$ , м Крок теплообмінних елементів в контурі $t$ , м

нерозривності, а також емпіричних залежностях для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі та гідравлічних втрат. Вихідні дані до розрахунків наведені у таблиці 1.

Визначаємо середню температуру ПГС в контурі, °C:  $t_{пов}^{cp} = \frac{t_{1пов} + t_{2пов}}{2}$ .

За середньою температурою знаходимо теплоємність ПГС  $C_{p пгс}$ , Дж/кг×°C та теплову потужність контуру за рівнянням теплового балансу, кВт:  $Q = G_{пгс} \times c_{p пгс} \times (t_{2пгс} - t_{1пгс})$ .

Приймаємо в першому приближенні температуру на виході з контуру  $t_{2пов}$  та розраховуємо середню температуру повітря в контурі, °C:  $t_{пов}^{cp} = \frac{t_{1пов} + t_{2пов}}{2}$ .

За середньою температурою знаходимо теплоємність повітря  $C_{p пов}$ , Дж/кг×°C та за рівнянням теплового балансу знаходимо уточнену температуру повітря за контуром ,

$$^{\circ}\text{C}: t'_{2 пов} = t_{1пов} - \frac{Q}{c_{p пов} \times G_{пов}}$$

Перевіримо точність розрахунку температури  $t_{2пов}$  за формулою: ,

$$\left| \frac{t'_{2 пов} - t_{2пов}}{t_{2пов}} \right| \leq \varepsilon$$

де  $\varepsilon$  – прийнята точність розрахунку. Якщо умова не виконується, повторюємо розрахунок з новим значенням  $t_{2пов}$ .

За середніми температурами теплоносіїв

визначимо необхідні для подальших розрахунків теплофізичні параметри повітря та ПГС – густину  $\rho_{пов}$ ,  $\rho_{пгс}$ , кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнти теплопровідності  $\lambda_{пов}$ ,  $\lambda_{пгс}$ , Вт/м<sup>2</sup>×К, динамічної  $\mu_{пов}$ ,  $\mu_{пгс}$ , Па×с, та кінематичної в'язкості,  $\nu_{пов}$ ,  $\nu_{пгс}$ , м<sup>2</sup>/с.

Еквівалентні діаметри проходу теплоносіїв, м:

$$d_{пов}^e = \frac{4 \times S_{пов}}{\Pi_{пов}}; d_{пгс}^e = \frac{4 \times S_{пгс}}{\Pi_{пгс}}$$

Для розрахунку швидкості повітря в каналах теплообмінної поверхні, застосовано спосіб який дозволяє скоротити об'єм варіантних розрахунків, який полягає у використанні взаємозв'язків швидкостей з наперед заданою величиною сумарної втрати тиску по повітряному тракту та тракту ПГС  $\delta P_{\Sigma}$  м/с :

$$\omega_{пов} = \left\{ \frac{\delta P_{\Sigma}}{\left[ 1 + \frac{\lambda_{пов}}{\lambda_{пгс}} \times \frac{d_{пгс}^e}{d_{пов}^e} \times \frac{\mu_{пгс}}{\mu_{пов}} \right]^{0.8} \times \frac{0.28 \times c_{p пгс} \times \rho_{пов} \times \mu_{пов}}{8 \times 0.018 \times \lambda_{пов} \times p_{1пов}} \times \frac{r}{1-r}} \right\}^{0.5} \times \frac{1}{\left[ 1 + \frac{L_{пгс}}{L_{пов}} \times \frac{0.416}{0.28} \times \frac{p_{1пов}}{p_{1пгс}} \times \frac{\rho_{пов}}{\rho_{пгс}} \times \frac{d_{пгс}^e}{d_{пов}^e} \times \frac{\mu_{пов}}{\mu_{пгс}} \right]}$$

Швидкість ПГС в каналах теплообмінної поверхні розраховується з умови рівності в елементі числа каналів для повітря та ПГС та розраховується за формулою, м:

$$\omega_{пгс} = \frac{\rho_{пов}}{\rho_{пгс}} \times \frac{S_{пов}}{S_{пгс}} \times \frac{G_{пгс}}{G_{пов}} \times \omega_{пов}$$

Числа Рейнольдса для повітря та ПГС:

$$Re_{\text{пов}} = \frac{\omega_{\text{пов}} \times d_{\text{пов}}^e}{\nu_{\text{пов}}}, Re_{\text{пгс}} = \frac{\omega_{\text{пгс}} \times d_{\text{пгс}}^e}{\nu_{\text{пгс}}}$$

Числа Нуссельта для повітря та ПГС розраховується за емпіричними залежностями:

$$Nu_{\text{пов}} = 0.018 \times Re_{\text{пов}}^{0.8}, Nu_{\text{пгс}} = 0.018 \times Re_{\text{пгс}}^{0.8}$$

Коефіцієнти тепловіддачі повітря та ПГС, Вт/м<sup>2</sup>×К:

$$\alpha_{\text{пов}} = \frac{Nu_{\text{пов}} \times \lambda_{\text{пов}}}{d_{\text{пов}}^e}, \alpha_{\text{пгс}} = \frac{Nu_{\text{пгс}} \times \lambda_{\text{пгс}}}{d_{\text{пгс}}^e}$$

Коефіцієнт теплопередачі контуру визначимо за формулою, Вт/м<sup>2</sup>×К:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{пов}}} + \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{пгс}}}}$$

$\lambda_{\text{ст}}$ , де – коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплообмінної поверхні.

Середній температурний напір визначимо як середній не логарифмічний при проті течії, °С.

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t_{1\text{пов}} - t_{2\text{пгс}}) - (t_{2\text{пов}} - t_{1\text{пгс}})}{\ln \frac{(t_{1\text{пов}} - t_{2\text{пгс}})}{(t_{2\text{пов}} - t_{1\text{пгс}})}}$$

Площа поверхні теплообміну контуру визначимо за рівнянням теплопередачі, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q}{\Delta t_{\text{ср}} \times K}$$

Знайдемо необхідні прохідні перетини всіх каналів по повітрю та ПГС відповідно до визначених вище швидкостей, м<sup>2</sup>:

$$S_{\text{пов}} = \frac{G_{\text{пов}}}{\rho_{\text{пов}} \times \omega_{\text{пов}}}, S_{\text{пгс}} = \frac{G_{\text{пгс}}}{\rho_{\text{пгс}} \times \omega_{\text{пгс}}}$$

Знайдемо кількість каналів по повітрю та ПГС, шт:

$$Z_{\text{пов}} = \frac{S_{\text{пов}}}{S_{\text{пов}}}, Z_{\text{пгс}} = \frac{S_{\text{пгс}}}{S_{\text{пгс}}}$$

Знайдену кількість каналів по повітрю та ПГС необхідно округлити до цілих та прийняти рівними один до другого  $Z_{\text{пов}} = Z_{\text{пгс}}$

Розраховуємо довжину шляху ПГС в теплообмінному елементі, необхідну по площі поверхні теплообміну з урахуванням периметра каналу для ПГС, м:

$$L_{\text{пгс}} = \frac{F}{Z_{\text{пгс}} \times \Pi_{\text{пгс}}}$$

Газова сторона приймається за розрахункову бо коефіцієнт тепловіддачі продуктів згоряння менше за коефіцієнт тепловіддачі повітря. Порівнюємо отриману довжину листа та прийня-

тий конструктивний розмір довжини листа та приймаємо величину  $L_{\text{пгс}}$  рівною або кратною стандартним довжинам профільних листів.

Розраховуємо ширину листа, м:  $b_{\text{л}} = 0.5 \times L_{\text{пгс}}$ , та розраховуємо кількість каналів по ширині листа, шт:  $n_{\text{к}} = \frac{b_{\text{л}}}{S_1}$ .

Округляємо отримане значення до цілого.

Визначаємо кількість теплообмінних елементів в контурі по фронту набігаючого потоку ПГС, шт:  $n_{\text{е}} = \frac{Z_{\text{пов}}}{n_{\text{к}}}$ .

Округляємо отримане значення до цілого.

В процесі перевірконого розрахунку уточнюються фактичні теплотехнічні характеристики при прийнятих розмірах та компоновці контуру.

Приймаємо в першому наближенні значення температури повітря на виході  $t_{2\text{пов}}$ , °С та по середнім значенням температур знаходимо теплофізичні властивості теплоносіїв.

Розраховуємо фактичну площу поверхні теплообміну секції, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{с}} = n_{\text{ес}} \times n_{\text{е}} \times \Pi_{\text{пгс}} \times L_{\text{пгс}}$$

Визначаємо фактичні сумарні прохідні перетини каналів теплообмінних елементів по повітрю та ПГС, м<sup>2</sup>:

$$S_{\text{пов}} = n_{\text{ес}} \times n_{\text{к}} \times s_{\text{пов}}, S_{\text{пгс}} = n_{\text{ес}} \times n_{\text{к}} \times s_{\text{пгс}}$$

Фактичні швидкості повітря та ПГС в каналах теплообмінних елементів, м/с:

$$\omega_{\text{пов}} = \frac{G_{\text{пов}}}{\rho_{\text{пов}} \times S_{\text{пов}}}, \omega_{\text{пгс}} = \frac{G_{\text{пгс}}}{\rho_{\text{пгс}} \times S_{\text{пгс}}}$$

Коефіцієнти тепловіддачі повітря та ПГС та сумарний коефіцієнт теплопередачі контуру знаходимо аналогічно проектного розрахунку.

Теплову потужність контуру визначимо за формулою для протитечії, кВт:

$$Q = (t_{1\text{пгс}} - t_{1\text{пов}}) \times \omega_{\text{пгс}} \times \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{F_{\text{с}} \times K}{\omega_{\text{пгс}}} \times \left( 1 - \frac{\omega_{\text{пгс}}}{\omega_{\text{пов}}} \right) \right] \right] \times \frac{1}{1 - \frac{\omega_{\text{пгс}}}{\omega_{\text{пов}}} \times \exp \left[ - \frac{F_{\text{с}} \times K}{\omega_{\text{пгс}}} \times \left( 1 - \frac{\omega_{\text{пгс}}}{\omega_{\text{пов}}} \right) \right]}$$

Вихідні температури повітря та ПГС знайдемо за формулами, °С:

$$t_{2\text{пов}} = t_{1\text{пов}} - \frac{Q}{\omega_{\text{пов}}}, t_{2\text{пгс}} = t_{1\text{пгс}} - \frac{Q}{\omega_{\text{пгс}}}$$

Перевіримо точність розрахунку температури  $t_{2\text{пов}}$  за формулою:

$$\left| \frac{t'_{2\text{пов}} - t_{2\text{пов}}}{t_{2\text{пов}}} \right| \leq \varepsilon$$

(для  $t_{2\text{пгс}}$  точність розраховується аналогічно), де  $\varepsilon$  – прийнята точність розрахунку. Якщо умова не виконується, повторюємо розрахунок з новим значенням  $t_{2\text{пов}}$ .

Після проведення перевірного розрахунку, отримані результати необхідно співставити з відповідними даними проектного розрахунку. Якщо розходження фактичних значень теплотехнічних характеристик контуру з їх значеннями, заданими перед проектуванням, не більше 0,5% то результати компоновки можна вважати задовільними.

Мета гідравлічного розрахунку – визначення втрат тиску по тракту контуру. Розраховуються коефіцієнти втрат тиску з повітряної сторони та сторони ПГС можна знайти за формулами:

$$\varepsilon_{\text{пов}} = 0.416 \times Re_{\text{пов}}^{-0.2} \text{ та } \varepsilon_{\text{пгс}} = 0.28 \times Re_{\text{пгс}}^{-0.2}.$$

Втрати тиску з повітряної сторони та сторони ПГС можна знайти за формулами:

$$\Delta P_{\text{пов}} = \varepsilon_{\text{пов}} \times \rho_{\text{пов}} \times \frac{L_{\text{пов}}}{d_{\text{пов}}^e} \times \frac{\omega_{\text{пов}}^2}{2},$$

$$\Delta P_{\text{пгс}} = \varepsilon_{\text{пгс}} \times \rho_{\text{пгс}} \times \frac{L_{\text{пгс}}}{d_{\text{пгс}}^e} \times \frac{\omega_{\text{пгс}}^2}{2}.$$

Відносні втрати тиску з повітряної сторони та сторони ПГС розраховуються за формулами:

$$\delta P_{\text{пов}} = \frac{\Delta P_{\text{пов}}}{P_{\text{пов}}} \times 100\% \text{ та}$$

$$\delta P_{\text{пгс}} = \frac{\Delta P_{\text{пгс}}}{P_{\text{пгс}}} \times 100\%.$$

Сумарні відносні втрати тиску з повітряної сторони та сторони ПГС розраховуються за співвідношенням:

$$\delta P_{\Sigma} = \delta P_{\text{пов}} + \delta P_{\text{пгс}}.$$

Якщо розрахована відносно сумарна втрата тиску по трактах контуру менше заданої то можна збільшити швидкість течії теплоносія на величину,

$$(\sqrt{\delta P_{\Sigma\text{задан}}} - \delta P_{\Sigma\text{расч}} - 1) \div 100\%$$

це приведе до зменшення площі поверхні теплообміну і маси системи.

Розрахунок геометричних характеристик контурів системи багатоконтурного піролізу, майже завжди, виконується як перевірочний. Тобто спочатку приймають конструкцію, а потім розрахунком перевіряють її здатність працювати на заданому режимі. На основі вихідної геометрії була розроблена тривимірна геометрична модель парогазового тракту модуля (рисунок 1). Методи оптимізації в моделюванні технологічних процесів та устаткування застосовувались з використанням комп'ютерних технологій ANSYS (Fluent), COMSOL Multiphysics. Модель стала основою для побудови кінцево-об'ємної розрахункової сітки, що складається з тетраедричних елементів середнім об'ємом  $2,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$ . У якості поверхні теплообміну використовується трубний пучок з шаховим компонованням трубок. Зовні він охолоджується повітрям, яке набігає поперек осі труб.

Охолодження повітрям було вибрано спираючись на легкість регулювання його витрати, та на низьку теплоємність. Це дозволяє регулювати теплоті у великих діапазонах, тим самим регулюється склад вихідної речовини (продуктів піролізу).

Виходячи з робочих креслень створено розрахункову сітку яку зображено на рисунку 3, вона складається з 350 тис. вічок [5].

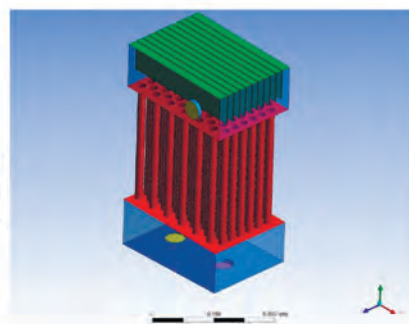
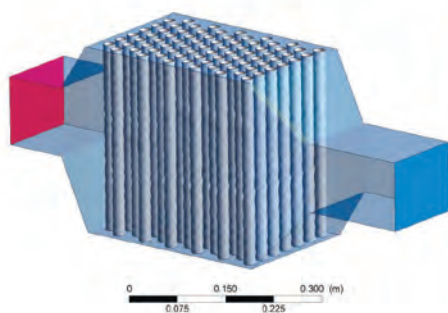
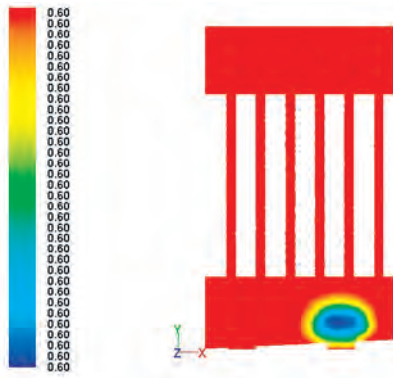
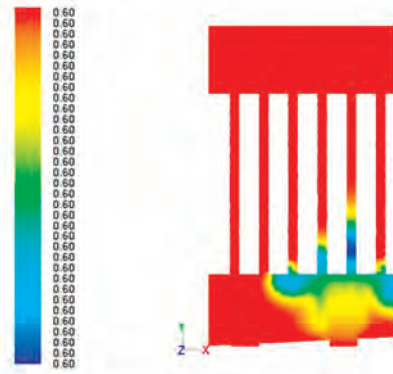


Рисунок 3. Розрахункова сітка контуру системи багатоконтурного піролізу



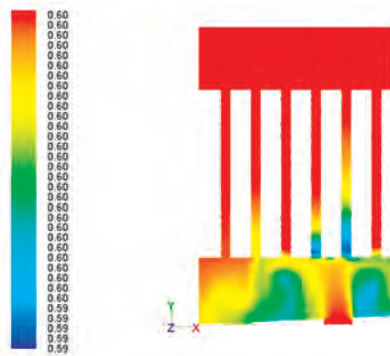
Contours of Volume fraction (phase-2) (Time=2.0000e-01)

Рисунок 4. Початкова фаза конденсації компонентів важкої фракції ПГС при входженні їх в перший контур трьох контурної циркуляційної системи



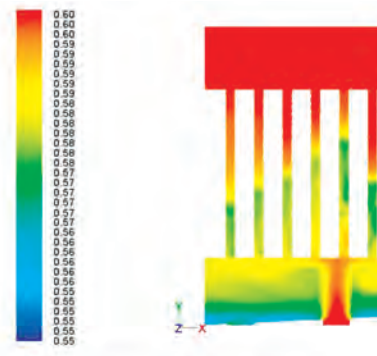
Contours of Volume fraction (phase-2) (Time=1.3000e+00)

Рисунок 5. Початкова фаза конденсації компонентів важкої фракції ПГС при входженні їх в другий контур трьох контурної циркуляційної системи



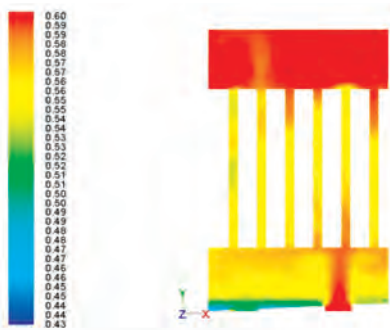
Contours of Volume fraction (phase-2) (Time=5.8000e+00)

Рисунок 6. Середня фаза конденсації компонентів важкої фракції ПГС при розподіленні їх в першому і другому контурах трьох контурної циркуляційної системи



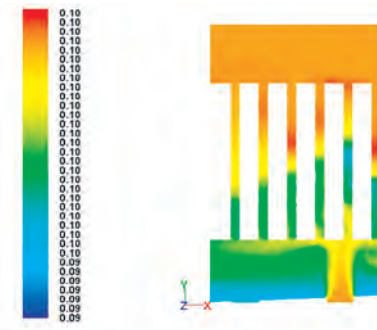
Contours of Volume fraction (phase-2) (Time=3.3800e+01)

Рисунок 7. Середня фаза конденсації компонентів важкої фракції ПГС при розподіленні їх в трьох контурах трьох контурної циркуляційної системи



Contours of Volume fraction (phase-2) (Time=1.8380e+02)

Рисунок 8. Початкова фаза концентрації парів середніх фракцій вуглеводнів і початок збору компонентів важких рідких фракції ПГС в нижній частині першого контуру трьох контурної циркуляційної системи



Contours of Volume fraction (phase-4) (Time=2.1800e+01)

Рисунок 9. Рис. 9 – Середня фаза концентрації парів легких фракцій вуглеводнів в трьох контурній циркуляційній системі

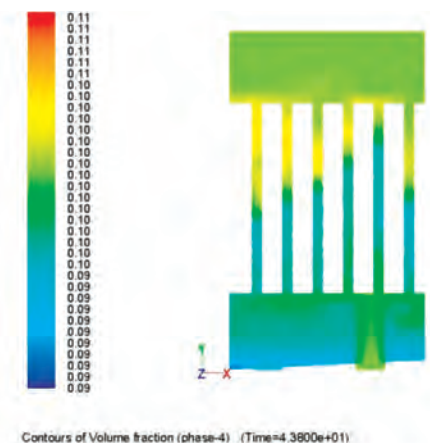


Рисунок 10. Установлена фаза концентрації парів легких фракцій вуглеводнів в трьох контурній циркуляційній системі

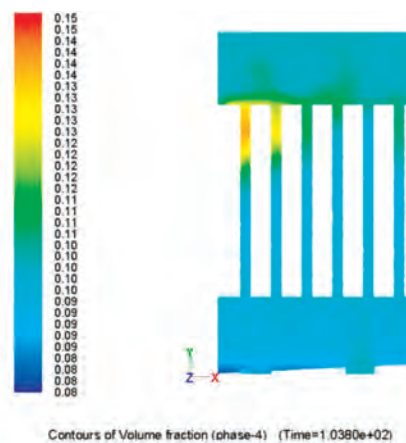


Рисунок 11. Початкова фаза конденсації важких фракцій вуглеводнів селективно відібраних від вихідних легких фракцій ПГС на третьому контурі в трьох контурній циркуляційній системі

Перевірочний розрахунок виконувався комп'ютерним моделюванням теплообміну між охолоджуючим повітрям та трубним пучком. Результати надані у вигляді зображень контурів розподілу кінетичної енергії, тиску та температури руху потоку повітря на максимальній витраті (рис. 4–11 та 12–14). Також проаналізовано втрати тиску при різній витраті повітря.

Початкова температура охолоджуючого повітря прийнята 20°C, середня температура стінок трубного пучка – 600°C. Також застосовувалися формули залежності теплофізичних властивостей повітря від температури, це значно зменшило похибку розрахунку. Проаналізовано діапазон витрат охолоджуючого повітря від 0 до 750 м<sup>3</sup>/год.

Шахове компонування трубного пучка було обрано виходячи з того, що теплопередача при

його обтіканні більша ніж при обтіканні коридорного пучка.

В результаті проведення обчислювального експерименту було досліджено динаміку нестационарних полів розподілу масових концентрацій основних компонентів робочого середовища: парів важких, проміжних та середніх фракцій парогазової суміші, суміші рідких фракцій. Також досліджувалась динаміка нестационарного поля ентальпій парогазової суміші. Результати обчислень представлені у вигляді діаграм на рисунках 4–12.

Найбільший коефіцієнт тепловіддачі буде у першому ряді шахового пучка. Починаючи з 3-го ряду коефіцієнт тепловіддачі не змінюється, це пов'язано з тим, що кінетична енергія течії за 3-м рядом стабілізується і на далі не змінюється.

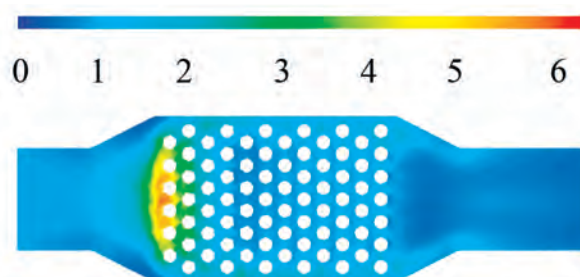


Рисунок 12. Розподіл кінетичної енергії потоку по проточній частині II-го контуру системи багатоконтурного піролізу

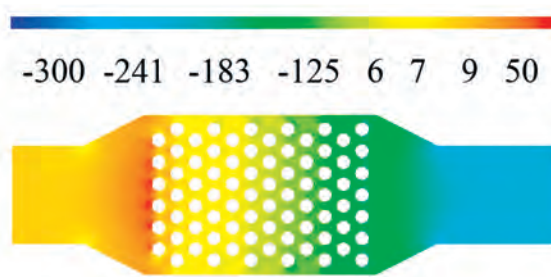


Рисунок 13. Втрати тиску по проточній частині II-го контуру системи багатоконтурного піролізу, Па

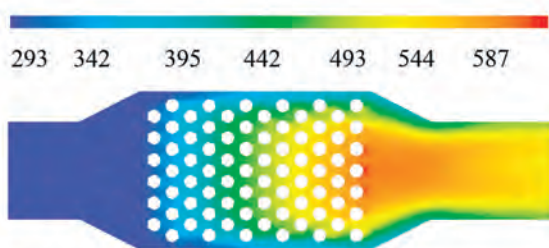


Рисунок 14. Температура по проточній частині II-го контуру системи багатоконтурного піролізу, К

На рисунку 14 зображено зміну температури при обтіканні охолоджуючого повітря гарячих труб. Аналізуючи це зображення можна зробити висновок, що необхідно зменшити зазор між трубним пучком та стінкою кожуха. Це дозволить збільшити кінетичну енергію у трубному пучку, оскільки збільшиться витрата через нього. Також необхідно врахувати кут розкриття дифузора та його довжину, це дозволить вирівняти швидкість набігаючого потоку на трубки, тим самим збільшить корисну площу теплообміну.

Моделюванням течії охолоджуючого повітря при різних його втратах були отримані значення аеродинамічного опору II-го контуру, які наведено у вигляді графіку (рисунок 15).

В результаті аналізу була доведена ефективність використання трубних пучків шахового компонування. Побудована залежність аеродинамічного опору від витрати охолоджуючого повітря. А також вказані основні рекомендації для проектування контурів з повітряним охолодженням:

- збільшення поперечного кроку призводить до підвищення коефіцієнта тепловіддачі та зниженню аеродинамічного опору;
- зменшення повздовжнього кроку призводить до підвищення коефіцієнта тепловіддачі та аеродинамічного опору;
- необхідно досягти найменш можливого зазору між трубним пучком та стінкою кожуха;
- дифузор повинен мати такий кут розкриття та довжину, які забезпечать рівномірність набігаючого потоку повітря на трубний пучок.

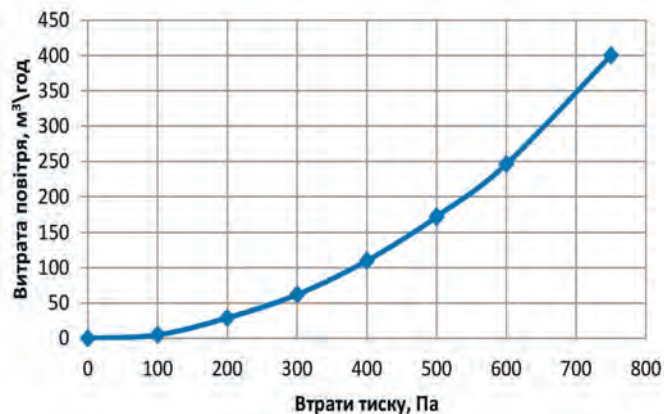


Рисунок 15. Залежність аеродинамічного опору II-го контуру системи багатоконтурного піролізу від витрати охолоджуючого повітря [1]

## Висновки

На основі моделювання конструкції системи охолодження реактору БЦП було встановлено що витрата продуктів згоряння відносно мала, а швидкість газів у газоході, за даними комп'ютерного моделювання, не перевищує 1 м/с, течія димових газів проходить в ламінарному режимі. В результаті коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки реактора низький.

Запропоновані наступні методи інтенсифікації процесу БЦП реактора циклічної дії:

- збільшення швидкості руху димових газів за рахунок підвищення теплової потужності головного пальника;
- зменшення живого перерізу газоходу, що приведе до збільшення швидкості димових газів;
- зміна геометричних розмірів газоходу реактора з метою збільшення теплообмінної поверхні (оребріння реактора, збільшення висоти реактора);
- турбулізація течії димових газів за рахунок різноманітної конфігурації перегородок димоходу.

Підтверджена ідентичність температурних характеристик контурів для одержання раціонального виходу цільового продукту при максимальному зниженні молекулярної маси незалежно від початкового складу сировини: 330–370°C для першого контуру; 230–250°C для другого і 120–160°C для третього контуру.

## Список використаних джерел

1. Markina L. M., Kryva M. S. (2018) study of technological parameters of pyrolysis of waste tires under static load. *Science and Innovation*. 2018, 14(6): 35-49. <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038>.
2. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Сербін С. І., Радченко М. І. (2012) Кондиціонування повітря на вході турбогенератора використанням скидної теплоти піролізної технології утилізації твердих побутових відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. № 3-4 (444), С. 128-132.
3. Кондратенко Ю. П., Козлов О. В. (2013) «Синтез та дослідження математичної моделі багатоконтурної циркуляційної системи комплексу екопірогенезису на нечіткій логіці.» *Вісник Херсонського національного технічного університету*, №1: 28-35. <https://journals.kntu.kherson.ua>
4. Ryzhkov S. S., Markina L. M., Rudiuk, M. V., Filatova, M. I., & Lytvynov, I. V. (2012). Експериментальна установка для дослідження процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Вісник НУК*, (1). <http://evn.nuos.edu.ua/>
5. Веселовський В. Б., Дреус, А. Ю., Сяєв А. В. (2004). Математичне моделювання та методи розрахунку теплотехнологічних процесів. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. ун-ту. <https://mmf.dnu.dp.ua/wp-content/>
6. Маляренко, В. А., & Сенецький, О. В. (2021). *Тепломасообмін в об'єктах альтернативної енергетики: підручник*. <https://eprints.kname.edu.ua/61298/>
7. Дунаєвська Н. І., Засядько Я. І., Засядько П. Я., & Щудло Т. С. (2017). Математична модель процесів спільного спалювання біомаси з вугіллям в котлі теплової електростанції. *Ел моделювання*, (39, № 3), 89-104. <http://www.irbis-nbu.gov.ua/>
8. Rohman B. B., Kobzar S. G. (2024) «Конструктивні особливості дослідної установки та числові дослідження процесу термохімічної переробки біомаси. Частина 1. Опис реактора й моделювання робочого процесу.» *Vidnovluvana energetika* 2 (77): 123-136. <https://ve.org.ua/index.php/journal/>
9. Іскович-Лотоцький Р. Д., Іванчук Я. В., Веселовський Я. П. (2016). Моделювання процесу спряженого теплообміну в установці для утилізації відходів. *Вісник машинобудування та транспорту*. № 1: 29-37. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream>
10. Муртазієв Е. Г., Сюсюкан Ю. М. (2022). Математичне моделювання: основні етапи та класифікація моделей. *Сучасні проблеми моделювання*, (24), 140–146. <https://10.33842/2313125X>
11. Саїк П. Б. (2024) «Взаємозв'язок між математичними моделями та експериментальними даними при дослідженні процесів підземної газифікації вугілля.» <https://ir.nmu.org.ua/bitstream/>
12. Коньшин В. І., Кравченко П. М. (2024) «Особливості теплогідравлічних розрахунків активної зони малих модульних реакторів, що охолоджуються водою під тиском, в умовах природної циркуляції теплоносія.» DOI <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2024.314601>
13. Галдінов М. В., Пешко В. А., Риндюк Д.В., Черноусенко О. Ю., Лементар, С. Ю. (2018). CFD-моделювання процесу піролізного високо-температурного розкладання сировини рослинного походження у побутових твердопаливних котлах. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, (24, № 2), 163-174. <http://nbuv.gov.ua/UJRN/>
14. Дзевочко А. І., Подустов М. О., Жерелюк Е. Е. (2017). Математичне моделювання процесів тепло-та масообміну в трубчастому реакторі сульфатування. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXV міжнар. наук.-практ. конф.,(м. Харків, 17–19 трав. 2017 р.). Харків (р. 22)* [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht\\_2018](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2018)
15. Hahto V. (2023). Electrically heated thermochemical reactors. Master's thesis, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT. <http://nbuv.gov.ua/UJRN/>

# ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОЦІНКИ ТРАНСКОРДОННИХ ЕКОЛОГІЧНИХ КОНФЛІКТІВ

Машков О. А.<sup>1</sup> Маркіка Л. М.<sup>1</sup> Присяжний В. І.<sup>1</sup> Оводенко Т. С.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ  
*mashkov\_oleg\_52@ukr.net*

В роботі розглядається технологія використання даних аерокосмічного моніторингу для оцінки транскордонних екологічних конфліктів. Для оцінки транскордонного впливу господарської діяльності екологічно небезпечних підприємств та можливих ризиків на стан довкілля натепер доцільно використовувати сучасні інформаційні технології (використання матеріалів дистанційного зондування Землі з супутників, застосування геоінформаційних технологій та систем штучного інтелекту). Космічні технології спостереження Землі використовуються в вивченні транскордонного впливу діяльності екологічних техногенно небезпечних об'єктів на довкілля. Здійснена інформаційна оцінка транскордонного екологічного впливу на довкілля. Розглянута технологія застосування багатоспектральних космічних зображень для оцінки стану транскордонного екологічного конфлікту. Запропоновані рекомендації з оцінки даних дистанційного зондування Землі транскордонного впливу діяльності Хотиславського кар'єру на стан довкілля. За даними оброблення аерокосмічних зйомок з використанням геоінформаційних технологій встановлено, що експлуатація у прикордонній території техногенно та екологічно небезпечних об'єктів може призвести до бі-

осферного конфлікту (транскордонного забруднення) та екологічної катастрофи: збільшення стоку вод у Чорне море і зменшення стоку вод у Балтійське море. Це призведе до уповільнення водного обміну в Шацьких озерах та як наслідок призведе до посилення природних і антропогенних факторів на евтрофування озер Шацького національного природного парку. Проведені дослідження свідчать про необхідність здійснення заходів щодо невідкладної організації постійного моніторингу за станом підземних вод на прикордонній території з метою постійного контролю за їх станом та своєчасного здійснення необхідних дій щодо попередження можливих негативних екологічних наслідків на території України.

**Ключові слова:** аерокосмічні технології, дистанційне зондування землі, інформаційна оцінка, моніторинг, система штучного інтелекту, транскордонні екологічні конфлікти.

**Application of aerospace information technologies in the system of supporting management environmental decisions using artificial intelligence for the assessment of transboundary environmental conflicts** O. A. Mashkov, L. M. Markina, V. I. Prysiazhnyi, T. S. Ovodenko.

The paper considers the technology of using aerospace monitoring data to assess transboundary environmental conflicts. To assess the transboundary impact of economic activities of environmentally hazardous enterprises and possible risks to the state of the environment, it is advisable to use modern information technologies (the use of remote sensing materials from satellites, the application of geoinformation technologies and artificial intelligence systems). Space technologies of earth observation are used in the study of the transboundary impact of the activities of ecologically hazardous objects on the environment. An information assessment of the transboundary environmental impact on the environment has been carried out. The technology of using multispectral space images to assess the state of transboundary environmental conflict has been considered. Recommendations are proposed for the assessment of remote sensing data of the transboundary impact of the activities of the Khotislav quarry on the state of the environment. According to the data of processing of aerospace surveys using geoinformation technologies, it was established that the operation of technogenically and environmentally hazardous objects in the border area can lead to a biosphere conflict (transboundary pollution) and an ecological disaster: an increase in the flow of water into the Black Sea and a decrease in the flow of water into the Baltic Sea. This will lead to a slowdown in water exchange in the Shatsk Lakes and, as a result, will lead to an increase in natural and anthropogenic factors for eutrophication of the lakes of the Shatsk National Nature Park. The conducted studies indicate the need to take measures to urgently organize constant monitoring of the state of groundwater in the border area in order to constantly monitor their condition and timely take necessary actions to prevent possible negative environmental consequences on the territory of Ukraine.

**Keywords:** aerospace technologies, remote sensing of the earth, information assessment, monitoring, artificial intelligence system, transboundary environmental conflicts.

### Постановка проблеми

В роботі розглядається технологія використання даних аерокосмічного моніторингу для

оцінки транскордонних екологічних конфліктів на прикладі Хотиславського піщано-вапняного кар'єру.

Безпосередня близькість Хотиславського піщано-вапняного кар'єру, який знаходиться на території Брестської області Білорусі усього за 25 кілометрів від Свितязю загрожує існуванню Шацьких озер в Україні. Нині цей кар'єр, у якому видобувають найбільш якісні в Європі кварцовий пісок і вапно, частково розроблений уже на глибину до 60 метрів, у той час як найглибше місце на Свितязі сягає 58 метрів. Шацькі озера мають карстове походження, знаходяться на водорозділі між Балтійським та Чорним морями.

Тому відтік води з цих озер у кар'єр загрожує їх обмілінням, а відтак порушенням екосистеми регіону взагалі. До того ж, хмари пилу, насиченого плюмбумом, калієм та сполуками сірки, які підіймаються з кар'єру у процесі видобування піску і вапна, щоденно осідають на дно озер і концентруються в мулі.

Подальше будівництво та видобуток крейди може порушити підземні водоносні системи та припинити живлення Шацьких озер.

Для дослідження та вирішення екологічної проблеми Хотиславського заповідника необхідне застосування сучасних інформаційних технологій (використання матеріалів дистанційного зондування Землі з супутників та застосування геоінформаційних технологій).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання застосування штучного інтелекту для вирішення завдань керування складними динамічними процесами розглядали Нільс Й. Нільссон, Стюарт Дж. Рассел, Пітер Норвіг [8, 9]. Парадигма оброблення інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень в галузі екологічної безпеки запропонована в роботах [3–7].

Проведений аналіз свідчить, що у теперішній час залишаються актуальними та не вирішеними питання застосування інформаційних аерокосмічних технологій в системі підтримки прийняття управлінських екологічних рішень з застосуванням штучного інтелекту для оцінки транскордонних екологічних конфліктів.

## Результати досліджень

### 1. Трансфер космічних технологій спостереження Землі в вивченні транскордонного впливу діяльності екологічних техногенно небезпечних об'єктів.

На сучасному етапі при дешифруванні космічних знімків одним з головних завдань є виділення ознак (прямих і непрямих) для розпізнавання об'єктів спостереження.

При цьому стрімкий розвиток географічних інформаційних систем (ГІС) дав можливість не лише аналізувати поточний стан об'єктів спостереження, але і проводити прогнозування екологічної ситуації (моделювання подій, що відбуваються) Це дає можливість приймати при необхідності обґрунтовані управлінські екологічні рішення [1, 2].

У теперішній час космічний моніторинг широко використовується при вивченні ландшафтно-ї структури, природних ресурсів і типів природокористування, а також для аналізу ступеню забруднення атмосфери, земельних і водних ресурсів, оцінки антропогенних і техногенних впливів на довкілля.

За допомогою використання існуючих та нових методик оцінки стану навколишнього природного середовища з використанням штучного інтелекту можливо оперативно вирішувати завдання в сфері природокористування і екологічної безпеки. Застосування штучного інтелекту в системі управління екологічною безпекою дозволяє:

- забезпечити об'єктивність і достовірність первинної, аналітичної і прогнозованої екологічної інформації;
- мати систематичні спостереження за станом навколишнього природного середовища та техногенно небезпечних об'єктів;
- підвищити оперативність здобуття і достовірність первинних даних за рахунок використання ефективних технологій процесів збирання, накопичення і оброблення екологічної інформації на всіх рівнях державного управління (місцевий, регіональний, державний);
- забезпечити сумісність технічного, інформаційного і програмного забезпечення системи управління екологічною безпекою з використанням штучного інтелекту;

- підвищити рівень і якості інформаційного обслуговування операторів та споживачів екологічної інформації на всіх рівнях функціонування системи підтримки прийняття управлінських екологічних рішень на основі мережевого доступу до розподілених відомчих і інтегрованих баз даних;

- забезпечити оперативність доведення екологічної інформації до органів виконавчої влади, інших зацікавлених органів, підприємств, організацій і установ;

- мати доступність екологічної інформації для населення.

Із врахуванням визначених принципів та нові підходи, що розроблені в роботах [3, 4] пропонується при здійсненні екологічного моніторингу застосовувати програмно-апаратні засоби і програмні продукти геоінформаційних систем та засоби автоматизованої обробки знімків дистанційного зондування Землі для створення карти динаміки екологічних процесів.

Процес створення карт динаміки поділяється на декілька послідовних етапів, протягом яких формуються її основні частини:

1. Етап. Підготовчий – формуються вимоги до створеної картоекологічного моніторингу, визначається район спостереження, здійснюється збирання і оброблення вихідної інформації.

2. Етап. Формування карти динаміки екологічних процесів - здійснюється за допомогою засобів автоматизованого оброблення знімків, на основі вихідних знімків, формується спеціальне зображення, яке відображає ймовірність того, що та або інша ділянка території піддавалася змінам за допомогою часового рознесення космічних знімків.

3. Етап. Формування багатоспектральної мапи динаміки екологічних процесів на основі існуючої виділеної спектральної характеристики мапи району спостереження.

4. Етап. Складання якісної порівняльної характеристики мапи динаміки екологічних процесів.

Розглянемо можливості застосування космічних технологій для проведення екологічного моніторингу з застосуванням штучного інтелекту та вивчення транскордонного впливу діяльності екологічних техногенно небезпечних об'єктів на прикладі впливу розробки Хотиславського кар'єру (Білорусь) на Шацький природний національний парк (Україна).

Тематична обробка та дешифрування космічних знімків виконується за допомогою програмного забезпечення TROAS – IMAGINE. Для побудови цифрових карт було використано програмне забезпечення ESRI ArcGIS. Базова цифрова картографічна основа створюється на територію біля Хотиславського кар'єру в масштабі 1:50.000 та містить шари: межі області; межі районів; об'єкти гідрографії (річки, озера, болота); населені пункти (міста, селища, села); дороги (автомобільні, залізничні).

Вихідні цифрові карти (в масштабі 1:50.000) створені в географічній системі координат UTM – WGS84 і передаються у shp-форматі.

При проведенні досліджень було використано орторектифіковані космічні знімки прикордонної території біля Хотиславського кар'єру, отримані у Національному центрі управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

## **2. Інформаційна оцінка транскордонного екологічного впливу на довкілля.**

Проведені дослідження свідчать, що через роботи, які ведуться біля Хотиславського кар'єру на території 95 гектарів (Білорусь), озеро Світязь (Україна) може зникнути. З огляду на міжнародну конвенцію про транскордонний вплив на природу, розробка Хотиславського кар'єру поки що зупинилась на видобутку піску. Відкритий шар крейди поки що не зачеплений, бо це пов'язано з подальшим заглибленням – за проектом глибина розробки – 43 метри на перспективу 25 років. За даними досліджень, в озерах Шацького регіону, які розташовані найближче до Хотиславського кар'єру, уже спостерігається зниження рівня водообміну у 5–6 разів. Ми вже маємо чіткий сигнал про те, що йде вже негативний вплив на довкілля України. Існує небезпека зневоднення території Національного заповідника «Шацькі озера», а також імовірність сейсмологічної загрози.

Нажаль Україна та Білорусь досі не погодили єдиної методики визначення екологічної шкоди внаслідок продовження і розширення діяльності Хотиславського кар'єру.

Небезпеку для екології Волині може становити нині друга черга Хотиславського кар'єру. Розбудова Хотиславського кар'єру вплине на рух ґрунтових вод у бік України. Від кар'єру до Во-

лині з її унікальними озерами – лише 300 метрів. Неспокій викликає те, що Шацькі озера – карстового походження, і ситуація нагадує бочку із водою. Якщо буде хоч маленька дірка у її дні, якщо трапиться біда бодай із одним озером, то це, викличе ланцюгову реакцію.

Системні екологічні питання транскордонного впливу діяльності Хотиславського кар'єру полягають в тому, що при пониженні ґрунтових вод навіть на метр зникнуть деякі види флори та фауни. А район Шацьких озер та озер у Ратнівському, так само прикордонному районі Волині, – це унікальне природне місце, це територія Національного парку. Адже можна збудувати завод чи вирити кар'єр, але не можна відновити навіки втрачену природу.

Кажуть, вода і так тече в бік північного сусіда, якщо ж біля кордону з'явиться яма - глибокий кар'єр - вона може піти туди. Ми знаємо що ці озера карстового походження – в пустотах ці озера. І якщо кар'єр потягне цю воду і тоді через ці пустоти вода може потрапити в кар'єр і осушить ці озера. Озера будуть міліти, а деякі – які не дуже глибокі- взагалі- можуть стати болотом. Як поведе себе карст, коли кар'єр вийде на проєктну потужність по видобутку, - ці процеси доцільно моделювати з використанням штучного інтелекту. Саме такий підхід забезпечить збереження біорізноманіття, екологічного стану, оцінку можливих екологічних ризиків.

## **3. Застосування багатоспектральних космічних зображень для оцінки стану транскордонного екологічного конфлікту.**

При застосуванні багатоспектральних космічних зображень для оцінки стану транскордонного екологічного конфлікту найбільш важливу роль відіграють дешифрувальні властивості космічних знімків і точність отримання необхідної інформації.

Класифікація космічних зображень з метою встановлення розповсюдження певних класів земного покриття, в цілому, може стати основою для створення систем управління екологічною безпекою. Для проведення класифікації космічних знімків нами був використаний програмний продукт ERDAS Imagine, який визнано одним із світових лідерів серед програмних продуктів подібного призначення. ERDAS Imagine широ-

ко застосовується для оброблення супутникової інформації у багатьох наукових та виробничих центрах провідних країн Заходу (США, Німеччина, Франція, Італія та ін.).

Застосування багатоспектральних космічних зображень дозволили виявити екологічні проблеми пов'язані з впливом Хотиславського кар'єру на екологію озера Світязь. Обробка матеріалів зйомки включає геодезичну (географічну) прив'язку, ліквідацію або облік геометричних спотворень знімків, перетворення і дешифрування їх.

Задача дешифрування – отримати якомога більше з аерознімків інформації, необхідної для поставленої мети. Отже, результати дешифрування залежать від інформаційної ємності аерознімків. Обсяг інформації залежить від розміру точок, з яких складається зображення, і від числа помітних тонів (кольорів). Дешифрування знімків Хотиславського кар'єру полягає в аналізі зображення (глибина, розмір) та інших об'єктів місцевості на знімках з метою відмежування і опису їх характеристики для вирішення різних

екологічних та природоохоронних завдань. Воно включає елементи як загальнотопографічного, так і власне геологічного дешифрування. У зв'язку з цим дешифрування кар'єру умовно поділяють на контурне і таксаційне.

Контурне дешифрування полягає у виділенні серед кар'єру масиву топографічних об'єктів і контурів площ для подальшого опису їх шляхом наземного огляду або способом аеротаксації. Таксаційне дешифрування є найбільш складним і важким. Воно полягає в поділі кар'єру на таксаційні ділянки та визначенні геологічного складу.

Існує велика кількість сучасних пакетів з оброблення даних ДЗЗ, які доцільно використовувати в системах штучного інтелекту. Підбір матеріалів космічної зйомки є важливим етапом проведення класифікації для моніторингу довкілля. Для робіт по тематичному дешифруванню та створенню цифрових карт прикордонних територій були використані орторектифіковані космічні знімки з супутника «Січ-2», які були отримані у 2013 році (рис. 1).

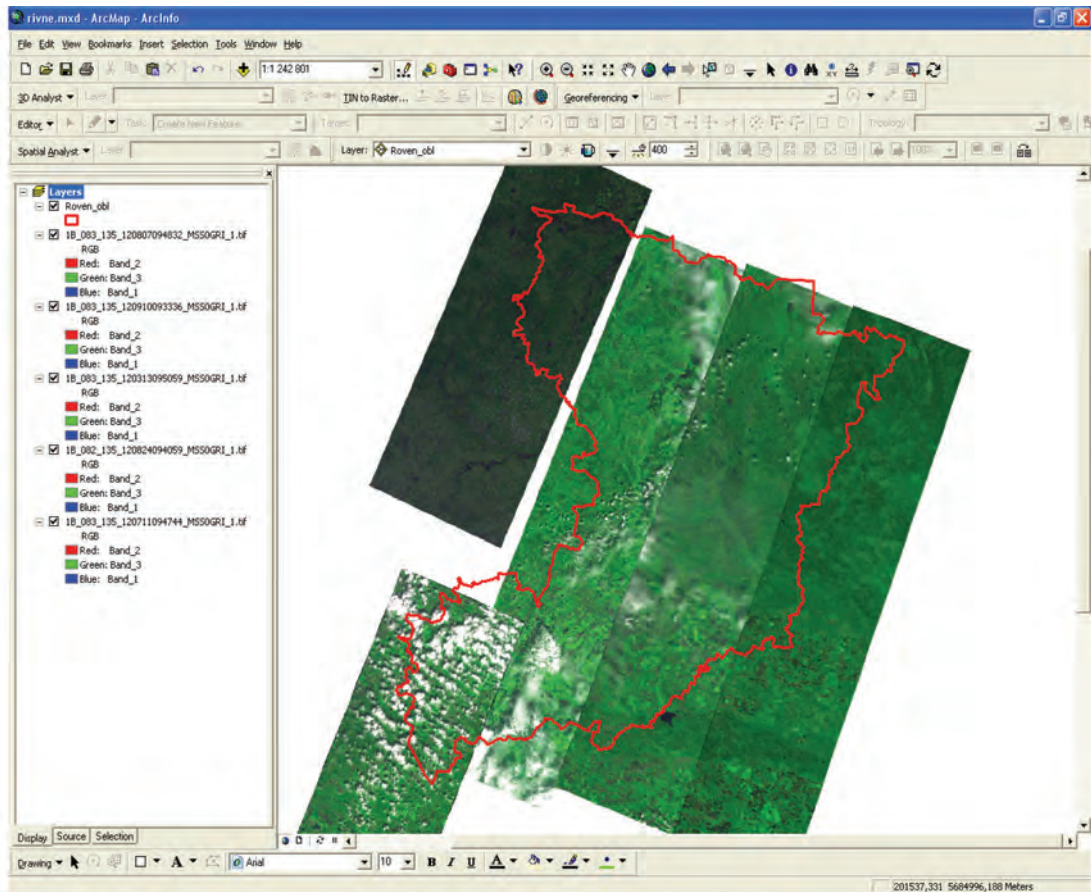


Рисунок 1. Розташування космічних знімків з супутника «Січ-2» на досліджувану територію

Технологічно процес дешифрування з використанням штучного інтелекту можна розділити на два основні етапи: машинна класифікація; камеральне візуальне дешифрування.

Машинна класифікація дозволяє автоматизувати процес дешифрування. Метою класифікації є одержання тематичної інформації із знімка. У процесі класифікації у комп'ютерних системах статистичні дані одержуються із спектральних характеристик усіх пікселів зображення. При цьому сортування базується на математичних критеріях. Існує два шляхи класифікації: з неконтрольованим навчанням; з контрольованим навчанням. Нами був обраний другий шлях розрахунку з метою його розповсюдження для можливих інших транскордонних екологічних конфліктів.

Дана класифікація проводиться за допомогою навчання по обраних еталонах (рис. 2) із створенням для кожного з них відповідної сигнатури, які в подальшому й використовуються для визначення центрів класів.

Класифікації, як і самі сигнатури можуть бути параметричні й непараметричні. Непараметричні правила: простір ознак (Feature space), правило паралелепіпеда. Класифікацію по методу контрольованого навчання можна розділити на

два основні етапи: створення набору сигнатур; автоматична класифікація і створення тематичного растрового зображення.

Процес формування сигнатур здійснювався у такій послідовності: автоматичне або ручне позначення навчального об'єкту з використанням додаткових даних; додавання спектрального образу до ряду сигнатур; перевірка наявності перетинання спектральних образів. Ця послідовність операцій чергується із злиттям схожих сигнатур, вилученням сигнатур, що перетинаються чи викликають сумнів.

Дана класифікація проводиться за допомогою навчання по обраних еталонах (рис. 2) із створенням для кожного з них відповідної сигнатури, які в подальшому й використовуються для визначення центрів класів.

Процес формування сигнатур доцільно завершити, якщо простір ознак максимально заповнений спектральними образами, які не перетинаються. Далі встановлювалися кольорові градації сформованих сигнатурами класів і давалася назва. В результаті створюється набір сигнатур, що визначають вибірку навчання. Кожна сигнатура відповідає класу та використовується у відповідності з вирішальним правилом для віднесення пікселів до того чи іншого класу (рис. 3).

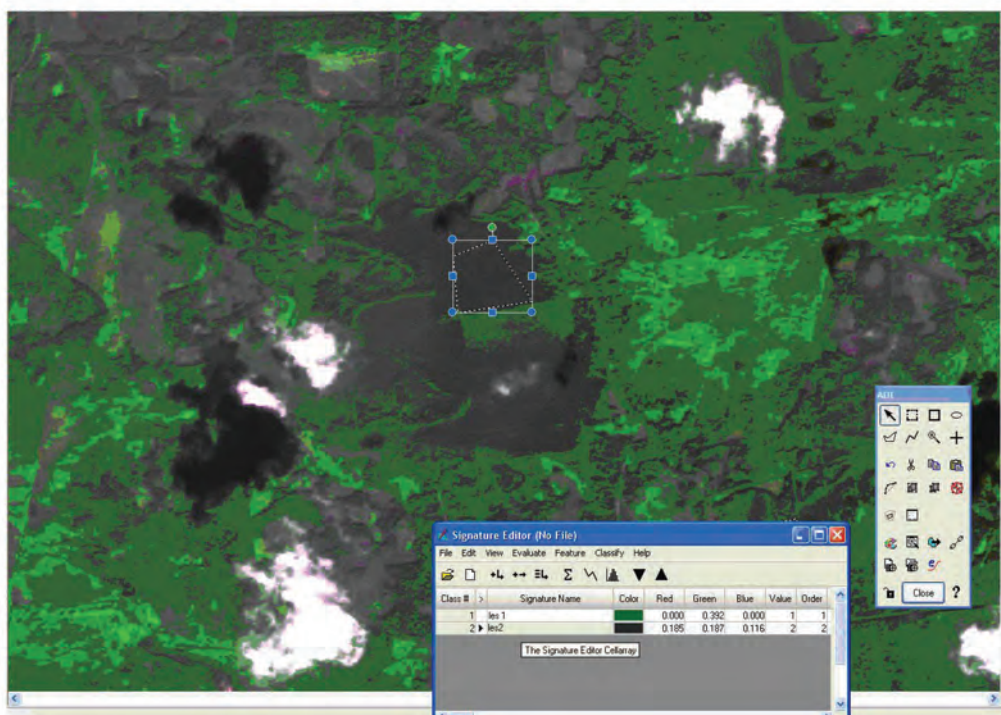


Рисунок 2. Контрольована класифікація. Процес створення еталонів

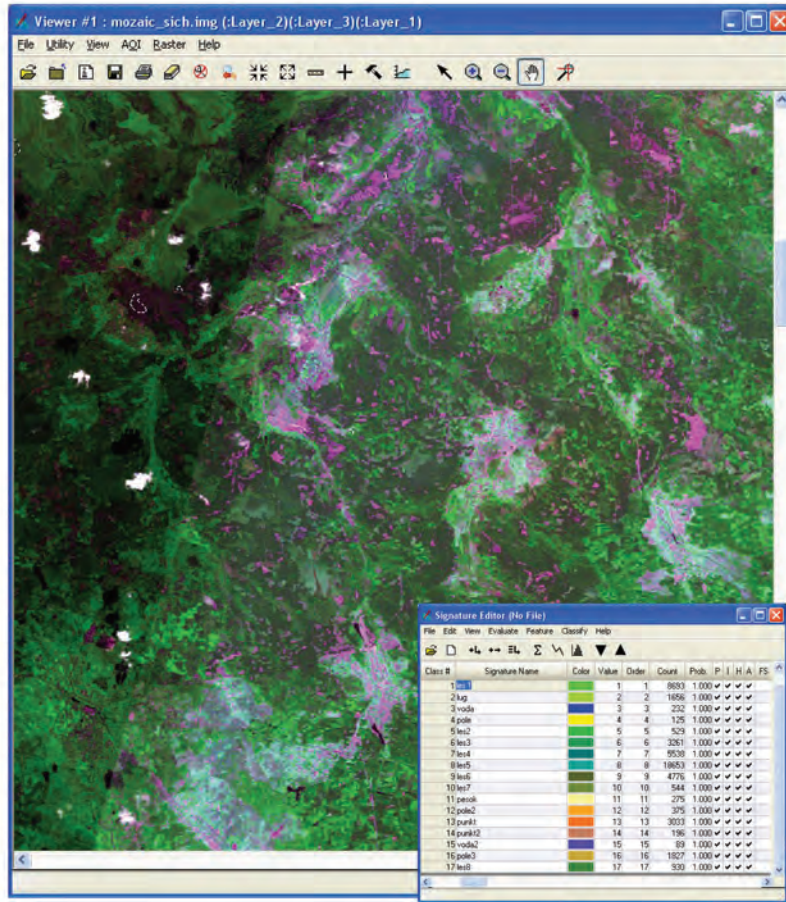


Рисунок 3. Створення зображення простору ознак

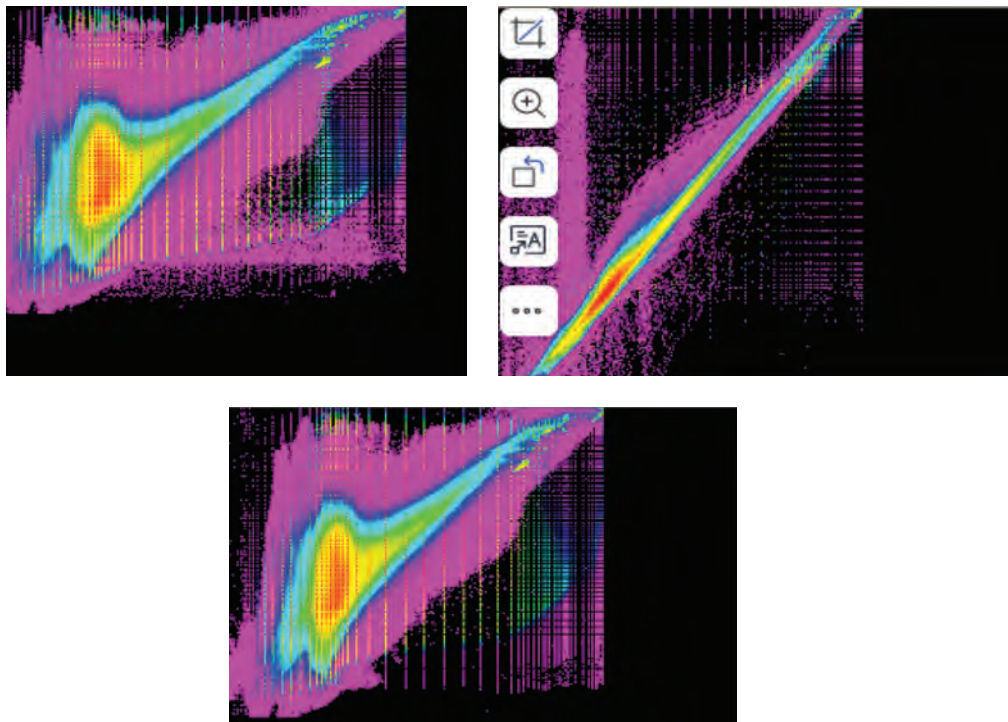


Рисунок 4. Варіанти результуючих зображень простору ознак, утворених на основі комбінацій різних каналів

Модуль класифікації ERDAS Imagine має багато підходів в залежності від можливостей знімка, типу створених сигнатур, вибору спеціаліста-аналітика. В процесі роботи нами були обрані сигнатури типу «еліпс» (рис. 4).

Для виконання автоматичного класифікування встановлювалися опції:

- головне вирішальне правило відсутнє - класифікувати пікселі, що потрапили до еліпса необхідно безпосередньо за створеними сигнатурами;
- пікселі, які не потрапили до еліпса потрібно класифікувати за правилом максимальної правдоподібності;
- перетинання еліпсів ігнорується.

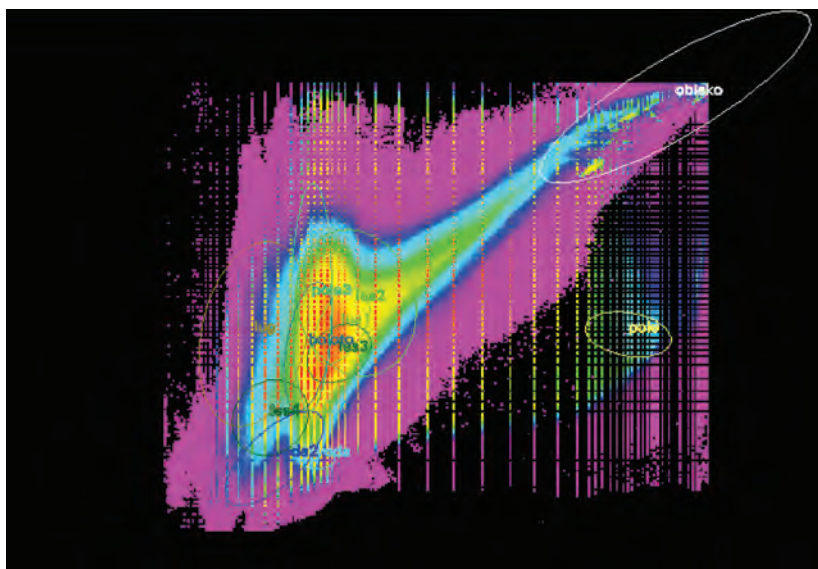


Рисунок 5. Перегляд об'єктів еталонів на зображенні простору ознак

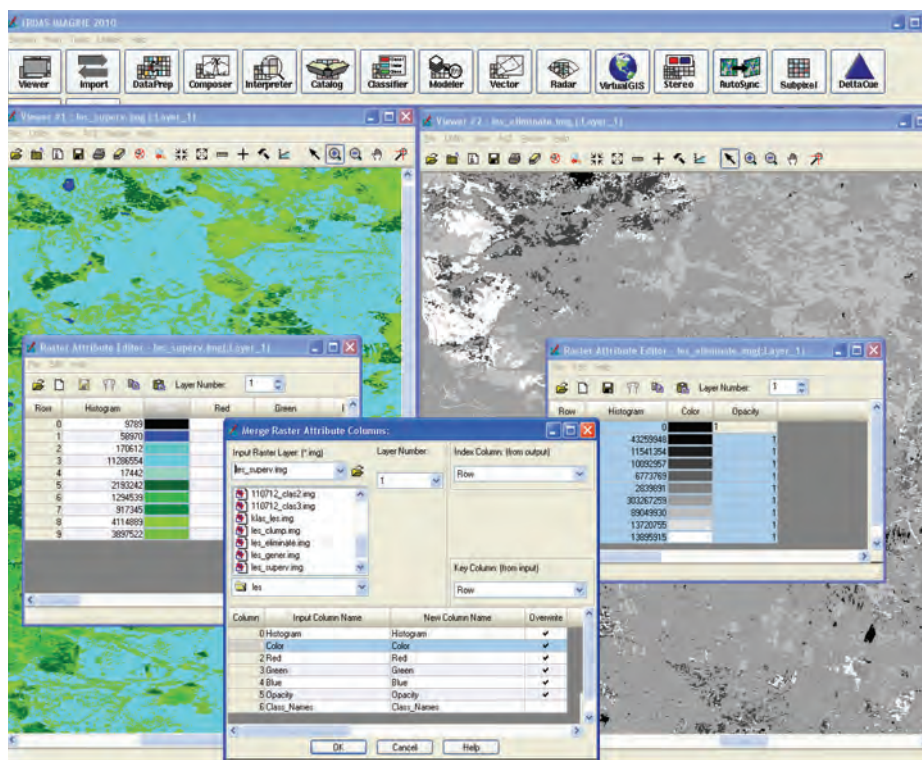
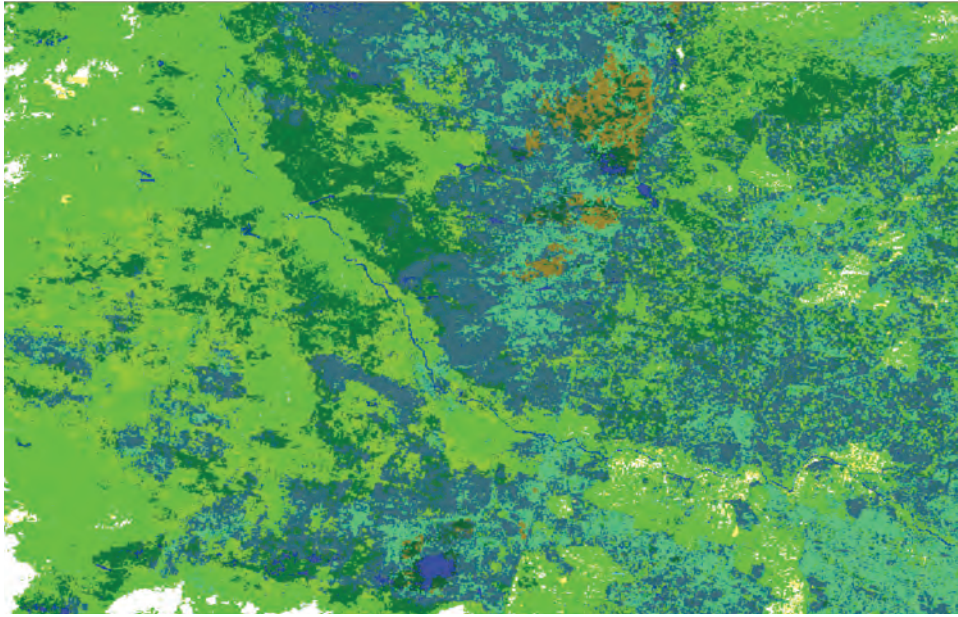


Рисунок 6. Процес встановлення зв'язку між еталонним і генералізованим зображеннями



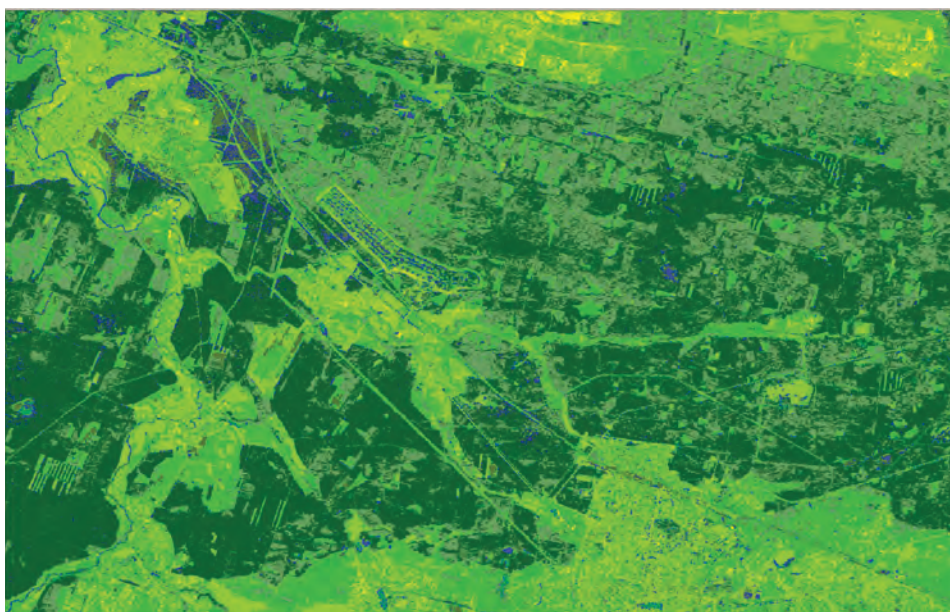
*Рисунок 7. Результуюче тематичне зображення*

Для того щоб отримати кольорове зображення було проведено поєднання колонок атрибутів растрів вихідного тематичного та отриманого після генералізації (рис. 5). В результаті чого колір напівтонової шкали зміниться на відповідний колір з еталонного файлу (рис. 6).

Після проведеної генералізації отримане тематичне зображення знову було проаналізоване з метою об'єднання (злиття) класів (функція

перекодування тематичного растрового шару). Тобто, якщо було виділено декілька видів поверхонь, полів, то вони об'єднувались в один клас. В результаті було отримане відредаговане зображення (рис. 8).

Отримане зображення використовується для екологічної оцінки наслідків транскордонного конфлікту (прогнозування екологічних процесів та оцінки екологічних ризиків).



*Рисунок 8. Фрагмент зображення після застосування функції перекодування*

## Висновки

1. Для оцінки транскордонного впливу господарської діяльності екологічно небезпечних підприємств та можливих ризиків на стан довкілля сьогодні доцільно використовувати сучасні інформаційні технології (використання матеріалів дистанційного зондування Землі з супутників та застосування геоінформаційних технологій).

2. При виконанні екологічно небезпечних робіт у прикордонних районах існує екологічна небезпека з приводу порушення підземних водоносних горизонтів. Це може привести до припинення живлення озер, існують загрози обміління, скорочення площ водного плеса, наслідком яких стане загибель унікальних природних водойм, втрата окремих видів флори і фауни.

3. Транскордонні екологічні конфлікти можуть привести до неминучих і незворотних змін для нормального функціонування сільського та лісового господарства, порушення водопостачання жителів прикордонних районів, погіршення гідромеліоративного стану осушуваних земель. Видобування і транспортування крейди провокує також техногенне забруднення навколишнього середовища повітряним шляхом.

4. За даними опрацювання аерокосмічних зйомок з використанням геоінформаційних технологій встановлено, що експлуатація у прикордонній території техногенно та екологічно небезпечних об'єктів може призвести до біосферного конфлікту (транскордонного забруднення) та екологічної катастрофи: збільшення стоку вод у Чорне море і зменшення стоку вод у Балтійське море. Це призведе до уповільнення водного обміну в Шацьких озерах та як наслідок призведе до посилення природних і антропогенних факторів на евтрофування озер Шацького національного природного парку.

5. Проведені дослідження свідчать про необхідність здійснення заходів щодо невідкладної організації постійного моніторингу за станом підземних вод на прикордонній території з метою постійного контролю за їх станом та своєчасного здійснення необхідних дій щодо попередження можливих негативних екологічних наслідків на території України.

## Список використаних джерел

1. Закон України «Про ратифікацію Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті від 19 березня 1999 року № 534–XIV. Угода між урядом України і Урядом Республіки Білорусь про співробітництво в галузі охорони навколишнього середовища від 16.12.1994 р.

2. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / [Лялька В.І., Федоровський О.Д., Попов М. О. та ін] під ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. – К.: Наук.думка, 2006. – 357 с.

3. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Оводенко Т. С., Печений В. Л. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень в галузі екологічної безпеки / Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, – Випуск 4(49), 2023, с. 144–152.

4. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у галузі екологічної безпеки. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Оводенко Т. С., Печений В. Л. / Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, -Випуск 3(48), 2023,с.7-16.

5. Машков О. А., Аль-Тамими Р.К.Н., Лами Д.Д.Х. Використання даних аерокосмічного моніторингу для оцінки транскордонних екологічних конфліктів / Збірка наукових праць / Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2015, – Херсон, 2018, с. 96–105.

6. Пічугін М. Ф., Машков О. А., Сащук І. М., Кирилюк В. А. Обробка геофізичних сигналів у сучасних автоматизованих комплексах, Житомир, вид. ЖВІРЕ, 2006, 176 с.

7. Системи штучного інтелекту: навчальний посібник. / Н. Б. Шаховська, Р. М. Камінський, О. Б. Вовк. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 392 с. – ISBN 966-941-197-6.

8. Nils J. Nilsson. The Quest for Artificial Intelligence. – 1. – Cambridge University Press, 2009. – 578 с. – ISBN 978-0521116398.

9. Stuart J. Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 3. – Pearson, 2015. – ISBN 978-9332543515.

UDC:628.35:620.3 (045)

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-14>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF PHOTOBIOREACTOR DESIGNS FOR MICROALGAE CULTIVATION

**Lesia Pavliukh<sup>1</sup>**

PhD, Professor of the Environmental Science Department  
State University «Kyiv Aviation Institute»

**Victor Repeta<sup>2</sup>**

PhD (Mathematics), Associate Professor of the Higher Mathematics Department  
State University «Kyiv Aviation Institute»

*e-mail: lesia.pavliukh@npp.nau.edu.ua*

*e-mail: victor.repeta@npp.nau.edu.ua*

**Abstract.** Environmental pollution is a matter of deep concern, especially after the invasion of Ukraine by the Russian Federation. The strategic importance of fresh water is widely recognised, but at the same time, a number of questions arise regarding the sustainable management of water resources in any scientific, social or political programme around the world. The world's water resources face serious quantitative and qualitative threats, despite the fact that environmental legislation is becoming increasingly stringent. This issue is particularly acute in the context of hostilities. The damaged and destroyed infrastructure has led to the degradation of ecosystems due to the inflow of untreated wastewater containing a significant amount of pollutants, including phosphorus and nitrogen compounds, which cause eutrophication of water bodies.

Today, microalgae are a very valuable raw material, as they are not only involved in the removal of nutrients from wastewater in the process of post-treatment, but also a promising biofuel in the context of

the energy crisis. The production of valuable microalgae biomass by cultivating them in closed systems - photobioreactors - is gaining popularity, as open systems do not always cope with the task due to their sensitivity to changes in ambient temperature, which vary significantly in different regions of Ukraine and the world. There are different designs of photobioreactors that have their advantages and disadvantages. The most important parameters that affect the efficiency of photobioreactors are: type of bioreactor; bioreactor shape; temperature control; economical carbon dioxide waste; high-quality simulation of the growing medium; material; terrain; controlled hydrodynamics; and freedom of cultivation.

The combination of biotechnology with innovative approaches to growing microalgae and unicellular organisms opens up new opportunities for sustainable industrial development and environmental safety in the water and wastewater sector.

**Keywords:** Photobioreactor, Microalgae, Wastewater, Nutrients, Cultivation.

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ФОТОБІОРЕАКТОРІВ ДЛЯ КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

**Павлюх Л. І.<sup>1</sup> Репета В. К.<sup>2</sup>**

Державний університет «Київський авіаційний інститут».

## Анотація

Забруднення навколишнього середовища викликає глибоке занепокоєння, особливо після вторгнення в Україну російської федерації. Стратегічна важливість прісної води є загальною рисою, але водночас виникає низка питань щодо сталого управління водними ресурсами в будь-якій науковій, соціальній чи політичній програмі в усьому світі. Світові водні ресурси стикаються з серйозними кількісними та якісними загрозами, незважаючи на те, що природоохоронне законодавство стає все більш жорсткішим. Особливо гостро це питання постає в умовах бойових дій. Пошкоджена та зруйнована інфраструктура призвела до деградації екосистем через надходження неочищених стічних вод, які містять значну кількість забруднюючих речовин, зокрема сполук фосфору та азоту, що спричиняють евтрофікацію водойм.

Мікрроводорості на сьогодні є дуже цінною сировиною, оскільки не тільки беруть участь у видаленні біогенних сполук зі стічних вод у процесах доочищення, а й є перспективним біопаливом в умовах енергетичної кризи. Отримання цінної біомаси мікрроводоростей шляхом їх культивування у закритих системах – фотобіореакторах, набуває все більшої популярності, адже відкриті системи не завжди справляються з поставленою задачею через чутливість до зміни температури навколишнього середовища, які у різних регіонах України та світу суттєво відрізняються. Існують різні конструкції фотобіореакторів, які мають свої переваги та недоліки. Найважливішими параметрами, які впливають на ефективність фотобіореакторів є: тип біореактора; біореакторна форма; контроль температури; економні відходи вуглекислого газу; якісна імітація живильного середовища; матеріал; рельєф місцевості; керована гідродинаміка; свобода вирощування.

Поєднання біотехнології з інноваційними підходами до вирощування мікрроводоростей і одноклітинних організмів відкриває нові можливості для сталого розвитку промисловості та забезпечення екологічної безпеки водо-каналізаційного господарства.

**Ключові слова:** фотобіореактор, мікрроводорості, стічні води, біогенні сполуки, культивування

## Introduction

Environmental pollution is a matter of deep concern, especially since the invasion of Ukraine by the Russian Federation. The strategic importance of fresh water is widely recognised, but at the same time, a number of questions arise regarding the sustainable management of water resources in any scientific, social or political programme around the world. The world's water resources face severe quantitative and qualitative threats, despite the fact that environmental legislation is becoming increasingly stringent. The water environment, as a fundamental and critical part of the human environment, plays a key role in the food chain. This issue is particularly acute in the context of hostilities. The damaged and destroyed infrastructure has led to the degradation of ecosystems due to the flow of untreated wastewater, which contains a significant amount of pollutants, including phosphorus and nitrogen compounds, which cause eutrophication of water bodies.

## Analysis of Recent Research and Publications

Microalgae are cultivated in open, closed and so-called hybrid systems. The synergy of biomass growth efficiency in open natural systems and in photobioreactors can be achieved by using such hybrid systems. The two-stage hybrid cultivation system is an advanced version of algae culture, where the cell medium is transferred when nutrients are found to be decreasing. The hybrid system can operate with small photobioreactors and large ponds and vice versa [1].

There are various designs of photobioreactors for cultivation [2-4]. A significant number of them can be used and are widely used for wastewater treatment by combining biomass cultivation with the removal of nutrients from the culture medium. This reduces the cost of both processes, reduces the amount of unwanted sludge and reduces the risk of eutrophication.

The study [5] emphasized the enhancement of microalgal productivity and quality (e.g., biochemical composition) using different colored photobioreactors (PBRs) exposed to ambient conditions. In this study, a unique approach had been applied to evaluate the microalgae co-culture (*Chlorella vulgaris*, *Chlorella*

sorokiniana, and Scenedesmus simris002) growth by exposing the colored transparent photobioreactors (white, blue, and green) to sunlight using a nutrient-rich (N, P) anaerobic reactor effluent produced after the treatment of domestic wastewater. Experimental results suggested that the white PBR increased the microalgae productivity by 2.3 to 3.5 times than blue and green PBRs, respectively. In addition, the FTIR spectroscopy analysis showed better quality microalgae (i.e., higher IR spectra) produced in white PBR compared with that of blue and green PBRs, respectively. Moreover, the microalgae cultivated in white PBR also showed high lipid content (38%) with the dominant biodiesel FAME composition (C16-C18) of 68.6% [5].

Principles of fluid mechanics, gas-liquid mass transfer, and irradiance controlled algal growth are integrated into a method for designing tubular photobioreactors in which the culture is circulated by an airlift pump [6]. A 0.2 m<sup>3</sup> photobioreactor designed using the proposed approach was proved in continuous outdoor culture of the microalga *Phaeodactylum tricorutum*. The culture performance was assessed under various conditions of irradiance, dilution rates and liquid velocities through the tubular solar collector. A biomass productivity of 1.90 g l<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (or 32 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) could be obtained at a dilution rate of 0.04 h<sup>-1</sup>. Photoinhibition was observed during hours of peak irradiance; the photosynthetic activity of the cells recovered a few hours later. Linear liquid velocities of 0.50 and 0.35 m s<sup>-1</sup> in the solar collector gave similar biomass productivities, but the culture collapsed at lower velocities [6].

### Problem Statement

Methods of additional treatment of nutrients involve converting them to an insoluble state, followed by sedimentation and disposal of the sediment. This requires additional costs. At the same time, demand for microalgae biomass is constantly growing. It is a raw material for the production of various commercial products [7, 8]. Different cultivation methods are used to produce it. However, they all have in common the use of biogenic elements.

Combining biomass cultivation with nutrient removal from the culture medium with wastewater treatment processes reduces the cost of both

processes, reduces the amount of unwanted sludge and reduces the risk of eutrophication.

Since microalgae are able to operate both in open systems (natural water bodies) and in closed systems (photobioreactors), an innovative approach that significantly reduces water pollution and improves water quality, in particular its organoleptic properties, is the bioremediation of water bodies with microalgae suspensions, which is based on algalization and maintaining ecological balance.

There is also an **urgent task** of finding microalgae cultures for use in photobioreactors and improving their efficiency, as well as developing methods for calculating the technological parameters and operating modes of the photobioreactors themselves.

### The Main Research

Special containers, so-called fermenters or bioreactors, are used in biotechnology production to increase biomass. The combination of biotechnology with innovative approaches to growing microalgae and unicellular organisms opens up new opportunities for sustainable industrial development, namely:

1. *Growing algae near power plants*: This technology is innovative and efficient, as it uses heat from power plants to provide the energy needed for algae growth. This not only increases the efficiency of production, but also reduces energy consumption from other sources.

2. *Environmental and economic benefits*: using heat from CHP to cover up to 77% of the algae cultivation needs can reduce energy costs while also reducing environmental impact. This increases the sustainability of production, helping to reduce emissions of carbon dioxide and other pollutants.

3. *Development prospects*: the development of bioreactor technologies and optimisation of microbial cultivation conditions can help to increase productivity, reduce costs and improve the quality of the products.

Photobioreactors are important tools for intensifying the production of biomass and valuable compounds from microalgae. Due to their advantages, they can become a key element in the development of sustainable biotechnological processes, in particular in the fields of bioenergy, wastewater treatment and food additives. Photobioreactors are devices designed

for the cultivation of photosynthetic microorganisms (microalgae, cyanobacteria) that use light as an energy source to synthesise organic compounds from inorganic ones. Closed-type photobioreactors were created as opposed to open-type ponds. The advantages of closed photobioreactors are:

*Controlled conditions:* closed systems allow for precise control of parameters such as temperature, pH, light intensity and CO<sub>2</sub> concentration, which significantly increases the efficiency of the photosynthetic process.

*Higher product yields:* intensive cultivation under controlled conditions can lead to significantly higher yields of the target product (biomass, oils, bioactive compounds) compared to open systems.

*Protection against contamination:* closed photobioreactors reduce the risk of contamination from the outside, as microorganisms are cultivated in an isolated environment.

Photobioreactors operate in the following modes:

1. *Accumulation mode:* In this mode, cultivation takes place during one production cycle. The microorganisms are grown until the desired biomass level is reached and then harvested. 2. *Accumulation mode with feeding:* In this mode, new substrate is continuously added to support the growth of microorganisms, allowing for higher productivity within a single cycle. 3. *Continuous Cultivation Mode:* This mode allows for the continuous introduction of new substrate and discharge of finished products, ensuring a stable production capacity.

In most cases, continuous cultivation of microalgae is carried out in a turbidostat, a photobioreactor in which a constant density of the microalgae suspension is maintained by periodically removing part of the culture and adding a nutrient solution. This allows for optimal conditions for microalgae growth without overloading the system. Bioreactors are rather complex engineering systems due to their multimodality and the use of special materials. Ensuring optimal conditions for microalgae growth requires constant monitoring and maintenance of a number of parameters: temperature, pH, redox potential of the medium, dissolved oxygen concentration, carbon dioxide and basic nutrients, liquid flow rate, mixing intensity, and sterilisation conditions. Modern bioreactors are equipped with automatic control systems that allow for real-time monitoring and regulation of temperature,

pH, concentration of dissolved gases and other parameters.

Any bioreactor is designed to create comfortable conditions for the life and cultivation of microorganisms, or rather, to provide them with breathing, nutrition and excretion of waste products, a comfortable temperature, etc.

The main part of the bioreactor is the fermenter. The fermenter is a tank that creates comfortable conditions for the cultivation of microorganisms, synthesis of products and accumulation of biomass. The main material used to make bioreactors is high-quality steel or titanium, as they are the most resistant and less susceptible to corrosion, and the inside of the bioreactor is also polished. Mass transfer and hydrodynamics are prerequisites for a bioreactor. Fermenters are equipped with all the necessary parts, such as stirrers, pumps, air filters for sterilisation and others, to maintain the required temperature, gas conditions and proper mass movement in the reactor. The sampler is also an essential part of bioreactors for sampling liquid during the biosynthesis process. Depending on the purpose and specifics of the bioreactor, additional parts may also be used. Bioreactor operation is monitored using instruments that measure the acidity of the medium, temperature, pressure, gas flow, aeration, etc. The details of the bioreactor, as well as the control of all its processes, directly affect the cultivation of microorganisms.

A bioreactor is not just an apparatus, but also complex physical, chemical, physicochemical and biological processes that take place to achieve maximum efficiency of the goal. Bioreactors should be in an accessible location to ensure easy access to replace the necessary parts in case of failure. In addition, the procedure should be as sterile as possible, and the necessary safety precautions must be taken to minimise negative effects on the cultivation process.

High-pressure steam is used to clean bioreactors, as the main contaminants of the reactor are fungi, bacteria and viruses, protozoa and yeast, which appear as a result of dust, working solutions or employees. Bioreactors must meet certain criteria: absolute tightness, stable volume of culture fluid, access to all parts of the bioreactor, and sterilisation.

Bioreactors are also divided into types depending on the volume of fermenters. Before use, the culture liquid or raw material is stored frozen and a small number of microorganisms are grown in the

The principle of operation of different types of photobioreactors [9-12]

Type	Action type
Mechanical	Mixing of the bioreactor contents is performed by a mixer, but leads to uneven mixing and death of microorganisms.
Airlift	Mixing is done by using the gas phase through the liquid, which leads to undesirable foam formation.
Gas-vortex	Mixing is performed by a quasi-stationary flow with axial countercurrent, which is created by gas swirling due to changes in pressure and friction force of the air flow on the liquid surface.
Aerobic	It occurs due to an active biological process with the supply of oxygen (aeration) and purifies water from biological substances, solid particles and other impurities.
Anaerobic	Based on fermentation, the invention relates to ecological processes of water purification from small particles and droplets with flocculation and coagulation and can be used to remove surfactants, fats, oils, petroleum products and other encumbered substances, suspensions and emulsions.
Membrane	It works on the basis of biological purification and membrane separation to purify water from organic substances, bacteria, viruses, and pesticides.
Cascade	It works on the basis of biological treatment of water, organic matter, nitrogen, phosphorus, and is designed to grow microalgae for use as biofuel.
Mixed	Used as both anaerobic and aerobic cultivation to produce biogas and heat simultaneously, which is trained to heal the microbial cultivation environment.

laboratory to the required volume and maximum efficiency in the bioreactor.

After that, the microorganisms are placed in a sterilised bioreactor in comfortable conditions to eventually produce biomass or nutrients from the metabolism of microalgae.

The Table 1 below shows how different types of photobioreactors work.

The efficiency of a photobioreactor also depends on the following parameters:

1. *Type of bioreactor.* There are two types: open and closed. The closed form of the bioreactor is the most common and is often used in the cultivation of microalgae.

2. *Bioreactor form.* Photobioreactors come in different shapes, which determine the working area of the photobioreactor. The shape of the bioreactor (e.g., in the form of pipes or flat) affects the intensity of lighting, the rate of passage of wastewater through the photobioreactor and the mode of operation of the fermenter.

3. *Temperature control.* Microorganisms should be cultivated at a temperature that is comfortable for them, as this directly affects the rate and amount of biomass and the efficiency of wastewater treatment.

4. *Economical carbon dioxide waste.* With sufficient CO<sub>2</sub> saturation, microalgae are intensively cultivated, their composition and life cycle changes. However, many microorganisms require high gas consumption, so low carbon dioxide inputs compared to the resulting higher biomass growth will be effective.

5. *High-quality simulation of the culture medium.* The creation of appropriate conditions directly affects the development and vital activity of microorganisms. The use of wastewater is a great advantage, as it is rich in many nutrients that accelerate the development of microorganisms.

6. *Material.* The material for creating a bioreactor is very important, most often glass is used, which is not a budget option. The disadvantage of such a bioreactor is its rapid contamination, which means

Table 2

**Comparative analysis of different types of photobioreactors**

Type of bioreactor	Advantages	Disadvantages
1	2	3
Plane-parallel	Large illumination surface area maximises solar energy utilisation	Gas and mass transfer in microbial or microalgal cultivation systems increases with increasing gas mixture feed rate (usually air or CO <sub>2</sub> ), but only up to a certain limit due to solution saturation, media turbulence and culture stress
	Low dissolved oxygen concentration	External light source makes the photobioreactor bulky
	The continuous cultivation method has proven to be particularly useful for studying the physiological characteristics of unicellular microalgae, cyanobacteria and purple bacteria. It allows cell culture to be maintained in a state of steady growth, which facilitates the study of their metabolic processes under controlled conditions	This design is not suitable for a wide range of microalgae, especially those that tend to form sediment or create a film on the reactor walls, which makes it difficult to mix evenly and maintain a homogeneous environment for their growth
	Simplicity of design makes it easy to increase the volume of cultivation without significant costs for equipment upgrades	Due to their design, flat-parallel reactors cannot be effectively sterilised by autoclaving or flowing steam, which is a critical aspect in the cultivation of microalgae
Tubular	Exceptionally productive system for highly efficient cultivation of many microalgae	Insufficient mixing turbulence in the upper part of the reactor leads to overgrowth of the walls with microalgae culture, which reduces access to light and creates problems with gas exchange
	The system operates in continuous mode	Possibility of accumulation of high concentrations of O <sub>2</sub> (poison for microalgae) in the culture medium if the tubes are too long
	Large illumination surface area	Reducing the CO <sub>2</sub> concentration along the tube can cause the microalgae to lose their carbon source
Large areas are required because long tubes are used		
	A certain fraction of the crop is beyond the illumination limit due to the spatial separation of the photosynthesis process inside the illuminated tube and the gas and mass exchange in the gas exchanger	
Reactors based on coaxial cylinders	The annular gap allows for the efficient use of mechanical stirring devices	Scaling up to volumes over 20 litres is not easy due to the uneven distribution of conditions
Vertical	High mass transfer rate with good mixing	Small surface area for illumination
	Compact, easy to operate and relatively inexpensive	If the elevator system is not used, cell settling may occur

expensive maintenance. The efficiency criterion is the use of cheap and affordable materials, as well as slow contamination.

7. *Terrain*. The area for the use of a bioreactor must meet many requirements, which affects the number of bioreactors and their versatility. A bioreactor that does not care about location and terrain has a strong advantage. Accordingly, a photobioreactor installed near or in sewage plants will be effective.

8. *Controlled hydrodynamics*. The efficiency criterion is met by a bioreactor in which it is possible to control the flow of liquid.

9. *Freedom of cultivation*. Not all bioreactors are suitable for growing microalgae that can reduce the level of pollutants in wastewater. For example, gas-vortex or mechanical, as many microorganisms have a fragile structure. A photobioreactor is also effective, as it can cultivate different strains of microalgae without harming the microorganisms. The Table 2 below shows the advantages and disadvantages of different types of photobioreactors.

## REFERENCES

1. Rakesh Narala, Kalpesh Sharma, Sourabh Garg, Skye Robin Thomas-Hall (2016). Comparison of Microalgae Cultivation in Photobioreactor, Open Raceway Pond, and a Two-Stage Hybrid System. *Frontiers in Energy Research* .Vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2016.00029>
2. Lesia Pavliukh, Sergii Shamanskyi. A photobioreactor for micro-based wastewater treatment. *Proceedings of the National Aviation University*. 2021.Vol. 87 (2). P. 57-64. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.87.15721>
3. Boichenko S. V., Pavliukh L., Shamansky S., Syrotina I., Todorovych O. Cascade Photobioreactor for Waste Water Treatment by Microalgae. *Modern Management Review*. 2020. Vol. XXV. No 27 (3). P. 17-29.
4. L. Pavliukh, S. Shamanskyi, O. Zaiats. A flat-parallel photobioreactor design for sewage water treatment. *Science-based technologies*. 2021.Vol. 51. No 3. P. 237-244. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.51.15689>
5. Khalekuzzaman, M., Kabir, S.B., Islam, M.B. et al. (2021). Enhancing microalgal productivity and quality by different colored photobioreactors for biodiesel production using anaerobic reactor effluent. *Biomass Conv. Bioref.* Vol. 11. P. 767–779. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00852-5>.
6. Molina E., Fernandes J., Acien F. G., Chisti Y. (2001). Tubular Photobioreactor Design for Algal Cultures. *Journal of Biotechnology*. Vol. 92. P. 113–131.
7. L. Pavliukh, H. Tsysar. Microalgae as a sustainable energy source. *Сучасні проблеми екології. XVII Всеукраїнської наукової on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю: 15 квітня 2021 р.: тези доп., Житомир, 2021. С.136.*
8. A.L. Ahmad, N.H. Mat Yasin, C.J.C. Derek, J.K. Lim (2011). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production. *Renewable and sustainable energy reviews*. Vol.15. Issue. P. 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.018>.

## Conclusion

The cultivation of microalgae requires knowledge of their physiology, especially their ability to capture light and related metabolism, as well as their behaviour in accordance with limiting factors.

The article substantiates the scientific and technological foundations of wastewater remediation processes and the development of tools for phytoremediation of wastewater through the use of developed photobioreactors of various designs. A comparative analysis of different types of photobioreactors was carried out. Criteria for the efficiency of photobioreactors have been developed. It is established that the type of bioreactor, bioreactor form, temperature control, economical carbon dioxide waste, high-quality imitation of the culture medium, reactor manufacturing material, terrain, controlled hydrodynamics, and freedom of cultivation are the most important parameters for calculating the efficiency of closed culture systems.

9. Jack Legrand, Arnaud Artu, Jeremy Pruvost (2021). A review on photobioreactor design and modelling for microalgae production. *Reaction Chemistry & Engineering*. P. 299. <https://doi.org/10.1039/d0re00450bff>

10. A. P. Carvalho, L. A., Meireles and F. Xavier Malcata (2008). Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. *Biotechnol. Prog.* Vol. 22(6). P. 1490–1506. <https://doi.org/10.1021/bp060065r>

11. O. Pulz (2001). Photobioreactors: Production Systems for Phototrophic Microorganism. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol. 57(3). P. 287–293. <http://dx.doi.org/10.1007/s002530100702>

12. M. Morweiser, O. Kruse, B. Hankamer and C. Posten (2010). Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol. 87(4). P. 1291–1301. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2697-x>

---

---

## ПРОЯВИ ЕКОЦИДУ В СУЧАСНІЙ ВІЙНІ В УКРАЇНІ

Маркіна Л. М.<sup>1</sup>, Громова І. Ю.<sup>1</sup>, Печений В. Л.<sup>1</sup>, Шевченко О. Є.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

<sup>2</sup>Національний транспортний університет

*alex05kartoxa@gmail.com*

У даній статті розглядаються найбільш резонансні прояви екоциду, учинених російською стороною, паралельно акцентується увага на досвіді України в умовах повномасштабної війни. Аналізуються концептуальні підходи до визначення вище згаданого явища, а також визначення його ознак, запропонованих українською та закордонною спільнотами. Висвітлюються випадки, які демонструють руйнівний вплив на українські екосистеми, зокрема наслідки цілеспрямованого знищення життєвих умов українців. Підкреслюється необхідність розширення юридичних рамок міжнародного права для офіційного визнання екоциду як складової частини геноциду. Дослідження спрямоване на підтримку розроблення нових стандартів захисту довкілля та національних спільнот.

**Ключові слова:** геноцид, екоцид, міжнародне право, війна, екосистема, умисне знищення, катастрофи, захист націй, сучасні конфлікти.

This article examines the most resonant manifestations of ecocide committed by the Russian side, with a parallel focus on Ukraine's experience in the context of a full-scale war. The author analyses the conceptual approaches to the definition of the above-mentioned phenomenon, as well as the definition of its features proposed by the Ukrainian and foreign communities. Cases demonstrating the devastating impact on Ukrainian ecosystems, in particular, the consequences of the deliberate destruction of the living conditions of Ukrainians, are highlighted. The need to expand the legal framework of international law to officially recognize ecocide as an integral part of genocide is emphasized. The study aims to support

the development of new standards for the protection of the environment and national communities.

**Keywords:** genocide, ecocide, international law, Ukraine, war, ecosystem, deliberate destruction, disasters, defense of nations, modern conflicts.

### Постановка проблеми

Геноцид – це часткове або повне знищення національної, етнічної, расової чи релігійної групи з умисним характером спрямування. Описуючи багаточисленні вбивства, учинені нацистами й комуністами під час Голокосту, у 1944 році юрист Рафаель Лемкін сформував й увів дане поняття в наукову термінологію [1]. Його класичне визначення, зафіксоване в Конвенції ООН «Про попередження злочину геноциду та покарання за нього» (1948 р.), наголошує на чітких діях, спрямованих на фізичне або психічне винищення певної групи.

Сучасні дослідження розширюють це визначення, включаючи таке поняття, як екоцид. Екоцид – це умисне знищення природного середовища, що зменшує шанси чи повністю унеможливує проживання виокремленої за чіткими ознаками частини населення на приналежній їй території [2]. Дане поняття проявляється в отруєнні та подальшому винищенні природних, водних і земельних ресурсів, які зрештою впливають на здоров'я, примітивні засоби існування та культурну ідентичність місцевої групи. Прикладом є використання військовими угрупованнями США хімічних агентів під час війни у В'єтнамі, де знищення отруйними речовинами унікальної флори та фауни тропічних лісів азійського народу пере-

творило раніше квітучу життєву територію на непридатну для проживання місцевого населення.

З відносно недавнього часу (з 1970-х років) поняття – «екоцид» стало частиною світової наукової термінології, а згодом – екологічним аспектом ширшого за розумінням «геноциду». Ця концепція набула популярності у світовій науці в останні десятиліття завдяки працям Поля Шандора і Даян Глені. Деякі дослідники навіть вважають, що екоцид має бути включений до міжнародного права як злочин проти людства, який вже стає на один рівень з геноцидом.

Наприклад, Бенджамін Вітгес у своїх роботах зазначає: навмисне отруєння водних ресурсів, вирубка лісів або знищення ґрунтів з метою позбавлення населення можливості виживання є не менш руйнівним, ніж пряме насильство.

Одним із прикладів екоциду, що привернув увагу міжнародної спільноти, є застосування дефоліантів у В'єтнамі під час воєнного конфлікту, розпочатим США. Армія Сполучених Штатів використовувала хімічну речовину «Agent Orange» для знищення джунглів, де переховувалися в'єтнамські партизани. Це призвело до руйнування природних екосистем, знищення посівів і серйозних проблем зі здоров'ям у місцевого населення, що можна трактувати як спробу знищення цілого народу через їхні екологічні умови проживання. На думку дослідника Адама Джонса, подібні дії є способом геноциду, спрямованого на поступове знищення етнічно-національної групи через знищення навколишнього середовища.

В Україні цей термін став як ніколи актуальним після повномасштабного вторгнення росії у 2022 році на територію нашої держави. Зокрема, через 100% руйнування міст, таких як: Бахмут, Соледар, Мар'їнка, Волноваха, Рубіжне й велику кількість інших міст; та прилеглих екосистем: лісової, степової та інших; що є фактичним підтвердженням систематичного знищення природного й урбаністичного середовища, мирного населення.

### **Актуальність даної теми та останніх публікацій**

Росія використовує не лише військові методи, але й залучає цілеспрямоване знищення життє-

во важливої інфраструктури, завдає шкоди довкіллю та загрожує умовам існування українського народу, що вже можна кваліфікувати як вираження геноцидної політики через екоцид. Ось кілька ключових аспектів, які обґрунтовують актуальність дослідження цієї теми:

Екологічна шкода та довгострокові наслідки. Пошкодження індустріальних об'єктів, таких як: нафтові сховища та хімічні заводи, завдали шкоди природним об'єктам, отруїли водойми з повітрям, що негативно позначилося на здоров'ї населення і, до того ж, створило загрозу для довкілля (з 24.02.2022 – на початок 2024 року): знищена техніка окупанта вже конвертувалася в понад 859 тисяч тонн відходів, що виробили більш ніж 83 тисяч тонн вуглекислого газу – елементу атмосфери. У водні об'єкти України потрапило понад 36 205 тонн сторонніх складових військової техніки з різними неорганічними матеріалами та ще 1600 тонн забруднювальних речовин. Усе це становить загрозу для водної флори та фауни, а, також, для здоров'я людини. Проте справжніх «апогеєм» екоциду в Україні став підрив дамби Каховської ГЕС 06.06.2023, зазначену в розділі «виклад основного матеріалу» – детальному огляді природних катастроф, учинених росіянами. Аналізуючи ситуацію щодо лісового масиву, можна зробити висновок, що на окупованих і деокупованих територіях через них очевидно переміщують важке військове обладнання, там же знаходяться військові частини та ведуться активні бойові дії. За даними Державного агентства лісових ресурсів України у 2022 році фактично 70% від площі всіх пожеж зареєстровано у 25-кілометровій буферній зоні, у 2023 році – 45%. Кількість і площа ландшафтних пожеж збільшуються відносно відстані до лінії фронту. Так у 2023 році щільність пожеж у 5-кілометровій буферній зоні була в 49 разів вищою порівняно із значенням щільності пожеж на решті території України, у 10-кілометровій зоні – у 10,5 разів, а у 20-кілометровій зоні – майже вдвічі. Також, у 2023 році порівняно з 2022 роком збільшилася щільність пожеж і кількість загорань ландшафтів, що свідчить про підвищення інтенсивності бойових дій (у 2–5 разів залежно від відстані до лінії фронту), зазначених в таблиці 1 [3].

Однак навіть та частина сільського господарства, звільненого від окупації, усе одно за-

## Щільність пожеж і кількість загорань ландшафтів\*

Buffer from frontline, кт (Буфер від передової, кт)	% from the Ukraine' territory (% від території України)		Fire density 1000 (Щільність вогню 1000)		Flamability 1000 (Горючість 1000)	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023
5	16,1	1,5	0,333	0,687	25,84	39,7
10	22,9	2,8	0,033	0,147	3,63	15,4
15	27,2	4,2	0,011	0,053	1,38	3,7
20	30,4	5,5	0,006	0,023	0,84	3,0
25	32,7	6,9	0,004	0,022	0,56	4,9
30	34,6	8,2	0,003	0,013	0,16	1,9
35	36,5	9,5	0,002	0,011	0,28	1,4
40	38,2	10,8	0,001	0,011	0,10	1,2
45	39,9	12,2	0,002	0,006	0,21	1,0
50	41,5	13,4	0,002	0,005	0,12	0,7
<b>Rest of the territory (Решта території)</b>	<b>58,5</b>	<b>86,6</b>	<b>0,058</b>	<b>0,014</b>	<b>3,63</b>	<b>1,6</b>

\* Direct impact Density of fires (Прямий вплив. Щільність пожеж)

лишається непридатною для користування та проведення детального аналізу багаточисленних злочинів російських військових, оскільки вона потребує розмінування, яке може тривати десятиріччями. Паралельні постійні обстріли з боку росіян призводять до багатьох пожеж та як наслідок - шкідливих викидів в атмосферу, до прикладу: загальне число шкідливих викидів в атмосферне повітря з початку повномасштабної війни становить 67.532.788 тонн [4]. Така кількість новоутвореного вуглекислого газу призводить до забруднення повітря та проблем з дихальною, серцево-судинною системами в усього населення; сприяє глобальному потеплінню та зміні екосистем. І це проблеми не лише України, а й усієї світової спільноти, адже довкілля не має кордонів. Наслідки екологічних злочинів, які росіяни чинять в Україні, з часом відчуватимуться і на інших континентах. Екоцид, як вираження геноциду, є особливо актуальним у цьому контексті, адже руйнування екосистем позбавляє українців умов для нормального життя на їхній рідній землі, спричиняючи загрозу майбутнім поколінням.

Концепція екоциду є важливою для розуміння сучасного геноциду, адже знищення певної групи людей може відбуватися як через пряме

фізичне винищення, так і через умови, що унеможливають її існування на історично важливій для культурної ідентичності території. Саме тому у сучасному глобальному суспільстві важливо переглянути підходи до класифікації воєнних злочинів та злочинів проти людяності з урахуванням масштабної шкоди, яка завдається не лише населенню, а й природі.

### Виклад основного матеріалу. Геноцид та екоцид як способи стирання генетичної пам'яті народу

Серед українських науковців, що аналізують геноцид з різних сторін, зокрема через поняття екоциду, є Володимир В'ятрович, Георгій Касьянов і Станіслав Кульчицький. Вони розглядають не лише фізичне винищення, але й руйнування природного середовища, інфраструктури, культури й ідентичності народу як новітніх форм геноциду.

1. Першим задокументованим проявом екоциду проти українців було руйнування природних ресурсів та аграрної інфраструктури у 1921 році. Масове вилучення продовольства з усіх сіл, та-

кож міст, радянськими військовими підрозділами, так званими продзагонами, створювало передумови для катастрофічної ситуації в регіонах, де наші співвітчизники втрачали можливість не лише годувати свої родини, але й готуватися до майбутніх врожаїв. Вилучення насіння, яке використовувалося для наступного циклу сівби, означало, що селяни втрачали можливість самостійно вирощувати нові культури, а тому залежність від центральної влади різко зростала.

Вплив таких дій не обмежувався лише людським фактором, адже раптове припинення нормальної сільськогосподарської діяльності, також, спричинило значну деградацію ґрунтів та втрату біорізноманіття. Рівень родючості українських земель різко впав через нераціональне використання ресурсів і втрату традиційних знань в управлінні земельними ресурсами, які зберігалися в українських громадах століттями. Цей екоцид мав довгострокові наслідки для екологічної стійкості регіону, зруйнувавши природні цикли вирощування та заготівлі харчів. Втрата природних ресурсів стала ще одним ударом по українському народові, виснаженому війнами та революціями.

2. З початком повномасштабного вторгнення росії до України 24.02.2022, українське населення спостерігає неймовірно велику кількість воєнних злочинів з боку російських найманців та військовослужбовців, більшу частину з яких можна класифікувати як прояви екоциду. Масштабні руйнування інфраструктури, в тому числі електростанцій, водо- та газопостачання, а також руйнування екологічно важливих територій в Україні, створили критичні умови для виживання українського населення. Науковці, зокрема Касьянов, зазначають, що вище зазначені поняття проявляються через масові бомбардування, обстріли та спроби перетворити територію України на непридатну для життя. Нижче згадаємо найбільші за наслідками трагічні події, скоєні росіянами.

Підриг дамби Каховської ГЕС 6 червня 2023 року – це найбільша техногенна катастрофа в Україні після вибуху на Чорнобильській АЕС. Вплив даного екозлочину найбільше зашкодив саме водним екосистемам. За словами голови держкомпанії «Укргідроенерго» Сироти І. (дане висловлювання схарактеризоване в джере-

лі №16, інших підтверджень не знайдено) через даний терористичний акт росіян стався значний витік турбінного мастила електростанції у річку Дніпро. «Екологічна катастрофа буде, тому що масло, яке було в турбінах, попало в річку. Об'єм може бути від 150 до 450 тонн, і ми не знаємо, розгерметизувалися трансформатори чи ні». За його словами «пізніше буде зрозуміло, що сталося з екологією в нижній частині Херсонської області» [5]. Команда «Let's do it Ukraine» за підтримки УкрНЦЕМ (Українського наукового центру екології моря) протягом минулого року провела три екологічні місії з метою дослідження наслідків впливу Каховської катастрофи на водні об'єкти. Відтак, здійснили відбір проб води у водоймах, колодязях, свердловинах, а, також, проби донних відкладів з річки Дніпро, затоплених територій та Дніпровсько-Бузького лиману. Отримані результати з Дніпра поблизу Херсона, Дніпровсько-Бузького лиману, Чорного моря поблизу Очакова та Одеської затоки показали однакову структуру забруднення. На всіх цих станціях вміст нафтопродуктів, токсичних металів: цинку, кадмію, миш'яку та хлорорганічних сполук перевищував гранично допустимі концентрації. Зазначені метали є токсичними для багатьох видів водних організмів, особливо за високої концентрації. Вони можуть впливати на репродуктивні, ростові та інші біологічні процеси у морських організмів. Навіть якщо окремі види можуть витримувати високі рівні міді та цинку, ці метали можуть накопичуватися в ланцюгу харчування, що призводить до ще більших концентрацій в організмах, які знаходяться на верхніх рівнях харчового ланцюга, таких як морські ссавці або люди. Населення ж, а саме 700 тисяч людей, що проживає біля постраждалої території та споживає морепродукти або п'є воду, що містить високі рівні міді або цинку, може зазнати проблем зі здоров'ям, зокрема проблеми з печінкою, серцем, нирками чи нервовою системою. Єдиним шляхом забезпечення населення безпечною водою є перехід на підземні джерела, оскільки регіон має значні ресурси підземних вод. Однак, на жаль, Херсонська область має найменше забезпечення експлуатаційних запасів підземних вод серед інших українських регіонів – лише 11,12%. Даний показник показує складність учиненої росіянами ситуації, наслідками якої можуть стати епіде-

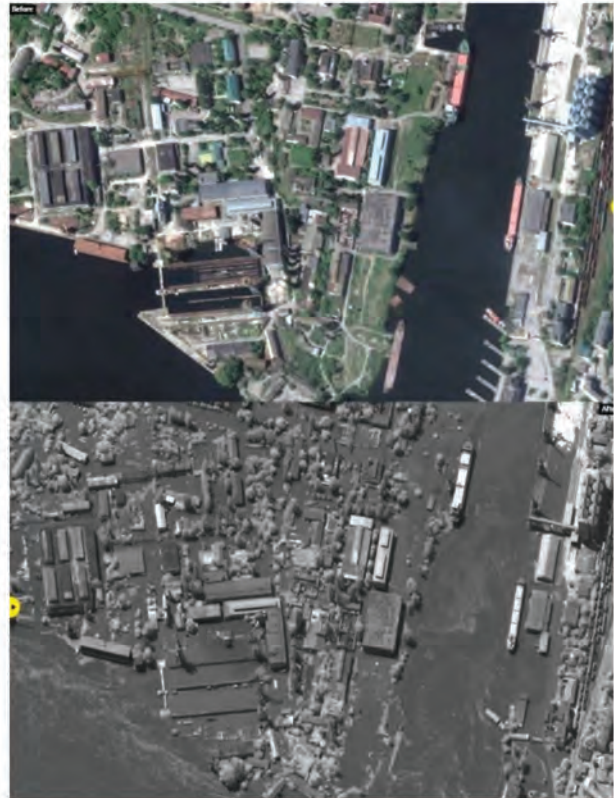


Рисунок 1. Наслідки руйнування (перший тиждень після техногенної катастрофи) [7]

мії кишкових інфекцій та вірусних захворювань через підтоплення та забруднення води на відповідних територіях (у селищах низький рівень каналізаційних систем, ризик спалаху епідемій є дуже великим) [6].

Вперше про забруднення Сейму на Чернігівщині стало відомо 26 серпня 2024 року. В річці масово гинула риба, а сама вода стала темного кольору. У воді виявили перевищення вмісту амонію та критично низький рівень кисню. 28 серпня забруднена вода з річки Сейм вже дійшла до Десни поблизу села Велике Устя, що у Сошницькій громаді. 9 вересня мертва риба з'явилася у Десні в межах Чернігова. Після цього за два дні з річки в межах міста зібрали сім тонн такої ж риби. За результатами проб води у річках Сейм та Десна, що відбирали 10 вересня, зафіксували забруднення органічного характеру. Воно, як повідомляло Міндовкілля України, 14 серпня потрапило у річку Сейм із цукрового заводу в селищі Тьоткіно Курської області рф. Станом на 11 вересня сума збитків довікллю через забруднення річок Сейм та Десна (в межах Чернігівської та

Сумської областей) склала понад 405 мільйонів гривень. На 22 вересня, за інформацією того ж Міндовкілля, вода в Десні посвітлішала, з'являються живі водні біоресурси. На дні осад темного кольору, неприємний запах та замору риби не спостерігають. За інформацією Державної екологічної інспекції (станом на 25 вересня) сума збитків, завдана довкіллю внаслідок першого забруднення води, становить понад 338 мільйонів гривень. Загалом з 26 серпня по 24 вересня з річок Сейм та Десна на Чернігівщині зібрали понад 28 тонн мертвої риби [8].

Окремо зазначимо, що 11 листопада 2024 з'явилася інформація щодо пошкодження армією рф Курахівського водосховища, яке вона активно бомбардувала протягом останніх трьох місяців. Нижче за течією від пошкодженої тернівської греблі прибуває вода. Наразі підтоплення будинків не фіксують, однак через постійні обстріли російських військових оглянути гідротехнічну споруду не вдається. Джерело: Курахівська дамба – росіяни підірвали її, які наслідки – Україна).



Рисунок 2. Вирізки з новин за участі вище згаданого колаборанта

Російські війська пересікли межі селища Асканія-Нова в першій половині жовтня 2022 року, а в другій – окупували більшу частину дендрологічного парку. Незабаром ті ж угруповання заборонили працівникам заходити на територію парку, унеможливаючи роботу науково-дослідницького персоналу щодо контролю й турботи флори з фауною. У 2023 російська адміністрація призначила директором захопленого біосферного заповідника «Асканія-Нова» Дмитра Мещерякова, який виявився колишнім співробітником СБУ [9]. Того ж року Мещеряков заявив про початок процесу переведення заповідника у федеральну власність росії, що поклало початок незаконним обмінам тварин між лівобережжям Херсонщини та окупованим Кримом. 1 грудня 2023 року псевдоочільник повідомив про «обмін» тваринами зоопарку «Асканія-Нова» з природним біосферним заповідником «Ростовський» та Асоціацією зі збереження й відновлення рідкісних і зникаючих видів тварин «Жива природа степу» з Ростова-на-Дону. Тоді вивезли сімох копитних: пару коней Пржевальського, бізонів, зебр виду Чапмана та оленя Давида. Загалом із заповідника вивезли близько 20 копитних.

Необхідним є зазначення даних щодо інших видів руйнації в заповіднику: станом на 1 липня 2024 року в різних зонах заповідника сталось 69 пожеж, які за даними дистанційного моніторингу вразило (спалило) 7109 гектарів території.

Більш деталізовані дані наведені в «табл. 2». За твердженнями ж окупаційних владних структур, тварини не постраждали, однак після пожежі на території знайшли розкладені тіла близько 150 сайгаків (найбільшого за численністю виду копитних у заповіднику «Асканія-Нова»). Виявилось, що вони загинули ще до вибуху. Ветеринари, які проводили огляд припускають: тварини померли від інфекційного захворювання брадзот, який став новизною в даному природничому середовищі. Водночас у серпні цього року кримська редакція російського телеканалу «Россия 1» заявила про подвійне збільшення поголів'я червонокнижних тварин у захопленому заповіднику, причиною якого, нібито, є забезпечення чіткого догляду з боку російської сторони. Однак, натомість, спостерігається лише знищення біосфери «Асканія-Нова», підтвердженням якого є оприлюднена оцінка збитків у розмірі понад 600 мільярдів гривень.

3. 19 листопада 2024 р. правитель росії володимир путін видав новий указ, яким затвердив оновлену ядерну доктрину рф. Причиною таких дій з боку влади агресора став дозвіл Білого дому щодо атак Україною вглиб рф. Умовою застосування ядерної зброї названо «старт балістичних ракет», про що повідомляють пропагандистські російські ЗМІ, серед яких: «РІА Новости», «ТАСС», «Новая газета Европа». Згідно з підписаним путіним документом, начебто «агресія»

**Зведена інформація про пожежі в Біосферному заповіднику  
«Асканія-Нова» (лютий 2022 р. – вересень 2023 р.) [10]**

№, з/п	Дата	Осередки займань / згарища (п)	Площа (га)	Тип земель / угідь
1	29.07.2022	1	2,08	населений пункт (колишня забудова)
2	10.08.2022	1	577,39	агроценоз (забур'янені перелоги)
		2	455,62	
		3	288,9	
3	18.08.2022	1	49,34	заповідний степ
			4,4	агроценоз (рілля)
4	25.08.2022	1	18,76	агроценоз
			3,1	населений пункт (залишки господарської інфраструктури)
5	01.11.2022	1	35,25	агроценоз (багаторічні перелоги)
6	17.03.2023	1	23,03	заповідний степ
7	22.08.2023	1	344,53	заповідний степ
8	01.09.2023	1	1791,72	заповідний степ
9	10.09.2023	1	51,76	агроценоз (рілля)
10	14.09.2023	1	137,61	агроценоз (рілля)
11	16.09.2023	1	10,51	населений пункт (залишки господарської інфраструктури)
12		2	55,5	агроценоз (рілля)
13		3	47,93	агроценоз (рілля)
14	17.09.2023	1	112,83	агроценоз (рілля)
			1,41	агроценоз (рілля)
15	18.09.2023	1	69,1	агроценоз (рілля)
			11,55	агроценоз (лісосмуга)
16		2	74,51	агроценоз (рілля)
17	19.09.2023	1	78,29	агроценоз (рілля)
18	21.09.2023	1	74,03	агроценоз (рілля)
19		2	62,89	
20		3	65,59	
21	22.09.2023	1	82,59	агроценоз (рілля)
22	26.09.2023	1	321,06	агроценоз (рілля)
23	27.09.2023	1	15,63	населений пункт (господарська інфраструктура)
<b>Всього</b>			<b>4866,91</b>	

проти РФ та її союзників з боку неядерної країни, однак за підтримки ядерної держави буде розглянута як спільний напад [11].

Також у зазначеному документі зазначається, що російська сторона може застосувати ядерну

зброю в разі «критичної загрози» суверенітету і своєї територіальної цілісності й Білорусії. Згідно з доктриною, рішення про застосування ядерної зброї має приймати сам лідер Кремля. Крім того, там висловлюється впевненість про «готовність

і рішучість рф застосувати ядерну зброю, яка забезпечуватиме ядерне стримування». Прессекретар володимира путіна дмитро пєсков вже заявив, що «використання західних неядерних ракет ЗС України проти рф за новою доктриною може спричинити ядерну відповідь».

**Чому це важливо?** Варто зазначити, що про розширення російської доктрини ядерного стримування путін заявив ще 25 вересня. Тоді глава Кремля заявив про ймовірність ядерної відповіді при «достовірній інформації про старт у бік росії засобів повітряно-космічного нападу», з уточненням, що «літаки стратегічної і тактичної авіації, крилаті ракети, безпілотники, гіперзвукові та інші літальні апарати». Після цієї заяви українські безпілотники щонайменше кілька разів атакували росію. Наслідком атаки стали багаточисельні питання від росЗМІ про відповідь рф на ці атаки (зокрема, на тлі розмов про зміну ядерної доктрини росії), спрямованими до пєскова; на що він відповів: «не потрібно надмірно апелювати до цього документа». Принагідно, що з початку повномасштабного вторгнення російська влада багато разів оголошувала різні «червоні лінії», порушення яких нібито призведе до відповіді ядерною зброєю. «Червоні лінії» в різний час стосувалися танків Леопард, західних ракет, винищувачів F-16 та іншого. Україна багаторазово переходила ці так звані «червоні лінії» Кремля. Але навіть захід українських військ на територію Росії та утримування під контролем ЗСУ десятків російських населених пунктів не призвели до якоїсь принципово нової реакції Кремля у відповідь на такі дії.

**Наслідки.** Однак вже через невеликий проміжок часу, а саме 21.11.2024, російський диктатор володимир путін показав свою, так би мовити, рішучість; організувавши запуск ракети «орешнік» по місту Дніпро [12], здійснений інертними або несправжніми боеголовками, які мають значну кінетичну енергію через свою швидкість, але не містять вибухових речовин – це є однією з ознак того, що ракета була розроблена для ядерного, а не звичайного застосування. Крім того, росія повідомила США про удар за 30 хвилин до його здійснення каналами зв'язку, призначеними для зменшення ядерного ризику, хоча американська

сторона й знала про певну загрозу ще напередодні. Метою даної операції рф була спроба переконати Україну та її західних партнерів у можливості ескалації путіна або всередині України, або безпосередньо атакувати країни НАТО, про що і йдеться в матеріалах The Economist. Видання зазначає, що ці погрози «слід сприймати серйозно, але не завжди буквально». За словами західних чиновників, наприкінці 2022 року Путін дійсно розглядав можливість застосування ядерної зброї, але його армія тоді відступала. Американські та європейські розвідні групи стверджують: російська влада й надалі рішуче налаштована уникати відкритого військового зіткнення з НАТО, адже удар по території однієї з країн Альянсу, швидше за все, призведе до застосування п'ятої статті НАТО про взаємну оборону [13].

4. Україна – одна з найбільших країн-експортерок зерна у світі, але повномасштабне вторгнення росії у 2022 році поставило під загрозу продовольчу безпеку та закупівельний потенціал не тільки України, а й інших держав [14].

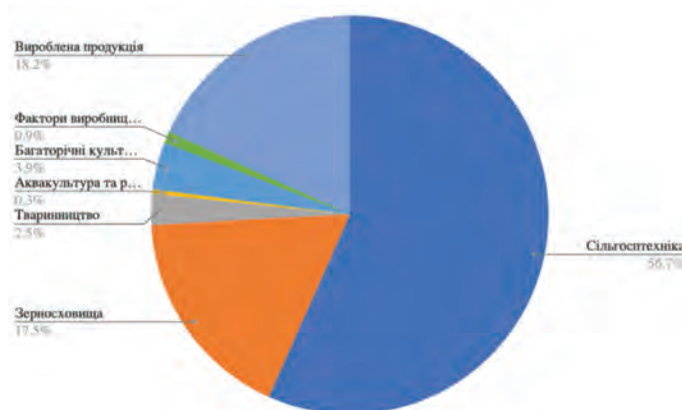
Блокований експорт і криза поточної посівної кампанії призвели до різкого зростання цін на світовому ринку, створюючи не лише ризики підриву діяльності агропродовольчого сектору України та національної економіки в цілому, але і передумови для голоду сотень мільйонів людей з інших континентів. Адже, у сучасних реаліях Україна починає відігравати все більшу роль на світовому аграрному ринку; до прикладу: всього два десятиліття тому експорт українського зерна був спроможний нагодувати 40 мільйонів людей, сьогодні ж – понад 400 мільйонів. У 2019-2021 роках на нашу країну припадало майже 10% світового експорту пшениці, 15% експорту кукурудзи, 15% ячменю та майже 50% соняшникової олії.

**Внутрішній погляд** на сільське господарство припадає близько 20% ВВП (із врахуванням суміжних галузей на ланцюгу створення доданої вартості) України і більше 40% загальних доходів від експорту. Крім того, первинний сектор є досить важливим з точки зору ВВП і зайнятості, оскільки близько 15% населення держави зайнято саме в СГ, а сільськогосподарські виробники забезпечують місцеве населення майже 100%-м споживанням їхньої продукції: різних зернових культур, овочів і не менше 80% споживання м'я-

са. З огляду на величезний потенціал сільськогосподарського виробництва України, війна серйозно впливає не тільки на глобальну, а й на внутрішню продовольчу безпеку [15].

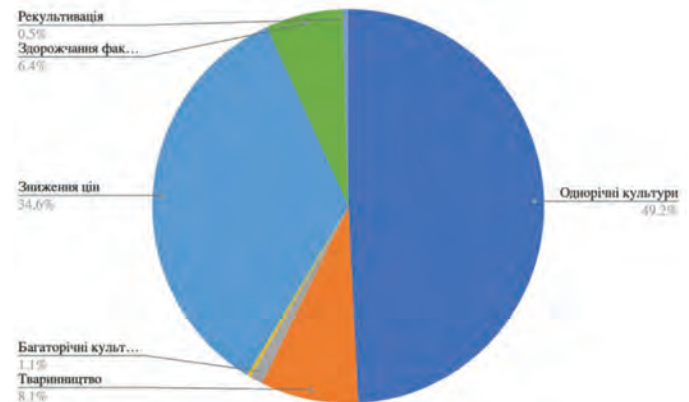
**Наслідки вторгнення рф в Україну для аграрного сектору.** Загальна вартість знищених активів становить 10,3 мільярда доларів. Втрати, що включають недоотриманий дохід виробників сільськогосподарської продукції та збільшення собівартості самого продукту склали 69,8 мільярдів доларів. Усі фінансові потреби щодо реконструкції та відновленні протягом наступних 10 років оцінюють в 56 мільярдів доларів США. Пріоритетні потреби на 2024 рік становлять 435 мільйонів доларів США, більшість із яких вже забезпечено спонсорським фінансуванням.

*Сільськогосподарські збитки.* Даний показник являє собою грошову вартість фізичних активів, пошкоджених або знищених через вторгнення рф. За два роки після вторгнення загальні збитки становлять 10,3 мільярда доларів, що на 18% більше, ніж у попередньому році. Відносно помірні темпи цього зростання можна пояснити тим, що значна частина активів у регіонах, де тривають наземні битви, вже була знищена в перший рік вторгнення. До трійки регіонів, що зазнали найбільших збитків, входять Запорізька, Херсонська та Луганська області, на які разом припадає 65% від загальних збитків.



*Непрямі втрати.* Окрім збитків через пошкодження та знищення фізичних активів, українські виробники с/г продукції стикаються з непрямыми втратами, спричиненими недоотриманням доходів з причин зменшення ефективності виробництва, зниженням цін і відповідним підвищенням собівартості продукції. На відміну

від збитків, які локалізуються на постраждалих від військових дій територіях, непрямих втрат зазнають аграрії по всій Україні. Загальні оцінені непрямі втрати становлять 69,8 мільярда доларів, що включає прогнозовані збитки для кількох основних категорій, які поширюються на 2024 календарний рік.



*Потреби у реконструкції та відновленні.* З огляду на масштаби збитків і втрат, яких зазнали вітчизняні сільгоспвиробники, повне відновлення потенціалу галузей первинного сектору потребує значних ресурсів. Виділяють дві великі категорії потреб, а саме: у реконструкції та відновленні. Потреби у першому пункті спрямовані на заміну пошкоджених активів; тоді як потреби у другому відображають ресурси, потрібні для відновлення сектору шляхом вирішення проблем, з якими стикаються виробники під час робіт; разом із підвищенням екологічності (sustainability) виробництва та його розвитку, із врахуванням доданої вартості та підтримку інституцій. Потреби оцінюються на період 10 років, при цьому особлива увага приділялася пріоритетним потребам на 2024 рік. Цю оцінку отримують, консультуючись з Міністерством аграрної політики та продовольства України (МАПП), іншими міністерствами, а також статистики виділеної донорської підтримки для сільського господарства України на визначений календарний рік. Загальні потреби у реконструкції та відновленні оцінюються в 56,1 мільярди доларів США [15].

**Другорядна проблема.** Після повномасштабного вторгнення росії українські порти у Чорному морі були заблоковані; через що наша держава, яка є однією з лідерок за кількісним показником експорту зерна, була змушена шукати альтер-

нативні шляхи (методи) постачання продукції, зокрема через Польщу або Румунію. Протягом 2022-го року саме ці стратегічні партнери спільно сприяли експорту зернових з України. Однак, додаткова пропозиція продукції сектору на їхніх ринках спричинила тиск на фермерів, через що у Польщі та Румунії відбувалися місцеві протести проти урядів. Ускладнюючою обставиною стала нездатність вищезазначених країн конкурувати з українською продукцією, цінова політика виробників якої є набагато демократичнішою ніж у конкурентів на європейському ринку. Саме тому розблокування кордону для вивезення українського зерна може вимагати кропіткої дипломатичної роботи та пошуку компромісних рішень між країнами. Деякі можливі шляхи вирішення цього питання можуть включати такі моменти, як: дипломатичні переговори (пошук компромісу й укладення відповідних угод між країнами таким способом може допомогти вирішити конфлікт та у підсумку – розблокувати кордон); торгівельні угоди (враховують інтереси обох сторін, що стимулюватиме відновлення експорту зерна); міжнародні посередники чи організації (залучення таких комунікативних елементів може допомогти обом сторонам знайти спільний шлях вирішення конфлікту) та їх відповідна підтримка (наприклад, звернення до Всесвітньої торгівельної організації (ВТО) додатково сприятиме вирішенню торгівельних непорозумінь); економічні заходи (використання економічних стимулів або санкцій може змусити країни переглянути свою позицію щодо відкриття кордонів для вивезення українського зерна).

**Шляхи вирішення ситуації.** Крім вище згаданих прикладів вирішення проблеми експорту української продукції первинного сектору, підприємствам обох сторін можна запропонувати диверсифікацію виробництва, а саме: створити цех з перероблення зерна на борошно, що в подальшому може дати можливість до подальшого розширення та створення виробництва хлібопекарських виробів тощо.

Також, є можливість виробництва корму для тварин, що дозволить забезпечити Україну додатковим м'ясом і в свою чергу допоможе розвитку тваринництва.

Проте і ці методи вирішення головного питан-

ня може вимагати складних і тривалих зусиль від усіх залучених [16].

Однак, не дивлячись на складнощі експорту продукції аграрного сектору (рис. 3), наступна інфографіка показує хоч не дуже яскраві, проте позитивні цифри й тенденції. Адже, до прикладу, у січні-вересні 2024-го року Україна експортувала 53,95 млн тонн аграрної продукції, з якої найбільші показники належать кукурудзі – 21,82 млн тонн і пшениці – 16,33 млн тонн. Також за цей період було продано 4,47 млн тонн соняшникової олії, 3,48 млн тонн шроту, 2,86 млн тонн ріпаку, 2,69 млн тонн ячменю, 1,88 млн тонн соєвих бобів, 0,25 млн тонн соєвої олії та 0,17 млн тонн соняшникового насіння. Через порти в січні було вивезено 5,5 млн тонн зернових, у лютому – 6,4 млн тонн, у березні – 6,1 млн тонн, у квітні – 6,4 млн тонн, у травні – 5,9 млн тонн, а у червні-вересні – трохи більше 4 млн тонн щомісяця. Обсяги перевезень автомобільним транспортом цього року становили максимум 153,7 тис. тонн у лютому. Пік перевезень залізницею припав на перший квартал року [14].



Рисунок 3. Складнощі експорту продукції аграрного сектору України у січні-вересні 2024-го року

## Висновки

Сучасне розуміння геноциду розширюється, включаючи і екоцид як форму знищення національних і культурних спільнот через руйнування природного та міського середовища. В українському контексті дії росії демонструють ці прояви: знищенні міста чи руйнація, учинені окупантами, що призвели до відмирання цілих екосистем. Це підтверджує потребу в правовому визнанні та регулюванні даного явища як форми геноциду. Подальші дослідження є важливими для міжнародного права, адже вони можуть стати основою для нових стандартів захисту людства й довкілля, подібних за обсягом й наслідками майбутніх конфліктів в інших регіонах чи цілих континентах.

## Список використаних джерел

1. Larysa Bilous. Lemkin, Rafael. Internet Encyclopedia of Ukraine. 2023.
2. Вереша Р. В., Кучинська О. П., Ковтун О. М. Екоцид у національному та міжнародному праві: сучасні виклики та перспективи нормативно-правового регулювання. Науковий вісник Ужгородського Національного Університету. Ужгород, 2023. Випуск 78: частина 2. С. 154-156.
3. Результати досліджень щодо ситуації із лісовими та іншими ландшафтними пожежами за період ведення бойових дій в Україні | Державне агентство лісових ресурсів України (опубліковано 06 лютого 2024 року о 13:59).
4. Мархель Юлія, Кошуба Анастасія, Поливач Марина. URL: Два роки екоциду: що вже накоїли росіяни в Україні та чим це загрожує українцям і світу? – Рубрика. Дата публікації: 23 лютого 2024.
5. Михайліченко Т. О., Нога П. П., Салашна А. В. Правове регулювання епідемічної безпеки в умовах війна та поствоєнного відновлення. Науково-дослідний інститут вивчення проблем злочинності імені академіка В.В. Сташиса НАПрН України, Харків, 2023. С. 122.
6. 291275 - Текст статті - 673101-1-10-20231121(1). pdf
7. Каховська ГЕС – наслідки руйнування ГЕС для екології та сільського господарства » Слово і Діло. Дата публікації: 13 червня 2023.
8. Горнова Вікторія. URL: Забруднення Сейму та Десни відходами цукрового заводу в РФ наразі не фіксують – Суспільне Чернігів. Дата публікації: 30 жовтня 2024.
9. Маньковська Вікторія. URL: Степ під загрозою. Що відбувається в окупованому заповіднику «Асканія-Нова»? Свідомі. Дата публікації: 7 вересня 2024.
10. Шаповал В. В., Біатов А. П., Василюк О. В. Пожежі в біосферному заповіднику «Асканія-Нова» в період російської окупації. Березень 2024. С. 174.
11. Погорілов Станіслав, Балачук Ірина. URL: Путін оновив ядерну доктрину РФ після дозволу Україні на дальні удари | Українська правда. Дата публікації: 19 листопада 2024.
12. Ракета Орешник – відповідальність за ескалацію в Україні повністю на Росії – Білий дім / NV / за ред. Дмитра Відоменка. Дата публікації: 22 листопада 2024.
13. Орешник – удар рф по Україні ракетною Орешник є готовністю Путіна до ескалації, пише The Economist / NV / за ред. Юлії Завадської. Дата публікації: 22 листопада 2024.
14. Експорт зернових з України – скільки продукції та яким транспортом експортували під час повномасштабної війни » Слово і Діло. Дата публікації: 18 жовтня 2024.
15. Нейтер Роман, Зоря Сергій, Муляр Олександр. Збитки, втрати та потреби сільського господарства через повномасштабне вторгнення. KSE: Центр досліджень продовольства та землекористування. URL: RDNA3\_ukr.pdf. 2024.
16. Орлова Станіслава, Масляєва Ольга. Ринок зерна: проблеми та шляхи їх вирішення. Дніпро, Україна. С. 3.

УДК 628.47:504.064: 539.3

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-16>

## ВНУТРІШНЬОЦИКЛОВА ГАЗИФІКАЦІЯ: ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Маркіна Л. М.,<sup>1</sup> Коваленко Д. В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, м. Київ

### Анотація

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) це перспективна технологія, що дозволяє отримувати енергію з вугілля та інших органічних матеріалів у більш екологічно чистий спосіб порівняно з традиційними методами спалювання. ВЦГ почала розвиватися в середині 20-го століття і з того часу зазнала значних удосконалень. Основні напрямки застосування включають виробництво електроенергії, хімічних продуктів та очищення технологій. Технологія ВЦГ забезпечує високу ефективність перетворення енергії, гнучкість використання синтез-газу та зменшення викидів забруднюючих речовин. Однією з новітніх розробок є метод флеш-газифікації, який дозволяє швидко перетворювати тверді органічні сполуки на синтез-газ з високою ефективністю. ВЦГ має значні перспективи для розвитку, особливо в контексті зменшення викидів парникових газів та переходу до більш сталих джерел енергії. Використання бінарного циклу в комерційних електростанціях дозволяє знизити витрати палива на 50%, що робить цю технологію економічно привабливою.

Ця стаття розглядає основні принципи ВЦГ, її переваги та недоліки, а також перспективи розвитку цього напрямку. Зокрема, аналізуються: Технологічні аспекти ВЦГ – розглядаються різні типи реакторів, умови процесу, а також методи подачі повітря або кисню для підтримки горіння. Вплив властивостей біомаси на ефективність ВЦГ – досліджуються вплив вологості, зольності, хімічного складу біомаси на вихід синтез-газу та його склад. Екологічні аспекти ВЦГ – аналізуються викиди парникових газів, золи та

інших забруднюючих речовин, а також можливі шляхи їх зменшення. Економічна ефективність ВЦГ – розглядаються витрати на будівництво та експлуатацію установок ВЦГ, а також можливі шляхи зниження вартості отриманої енергії. Інтеграція ВЦГ в промисловість знижує залежність від одного джерела енергії, оскільки вона дозволяє використовувати різні види пального, включаючи низькокалорійні джерела.

На основі аналізу переваг та недоліків ВЦГ робиться висновок про те, що цей напрямок має великий потенціал для розвитку, особливо в контексті переходу до зеленої енергетики.

Подальші дослідження та впровадження нових технологій, таких як флеш-газифікація, можуть сприяти підвищенню ефективності та зниженню витрат, забезпечуючи сталий розвиток енергетичної інфраструктури

**Ключові слова:** внутрішньоциклова газифікація, біомаса, відновлювані джерела енергії, синтез-газ, енергетична ефективність, екологічні аспекти, економічна доцільність.

### Abstract

In-cycle gasification (IWG) is a promising technology that allows you to obtain energy from coal and other organic materials in a more environmentally friendly way compared to traditional combustion methods. The VCG began to develop in the middle of the 20th century and has undergone significant improvements since then. Major applications include power generation, chemical products, and purification technologies. VCG technology provides high energy conversion efficiency, flexibility in the use of syngas and reduction of pollutant emissions.

One of the latest developments is the flash gasification method, which allows you to quickly convert solid organic compounds into syngas with high efficiency. The WTC has significant prospects for development, especially in the context of reducing greenhouse gas emissions and transitioning to more sustainable energy sources. The use of the binary cycle in commercial power plants can reduce fuel consumption by 50%, which makes this technology economically attractive. This article discusses the basic principles of VCG, its advantages and disadvantages, as well as the prospects for the development of this direction. In particular, the following are analyzed: Technological aspects of VCG: different types of reactors, process conditions, as well as methods of supplying air or oxygen to support combustion, are considered. Influence of biomass properties on the efficiency of VCG: the influence of moisture, ash content, chemical composition of biomass on the synthesis gas yield and its composition are investigated. Environmental aspects of the WCG: emissions of greenhouse gases, ash and other pollutants are analyzed, as well as possible ways to reduce them. Economic efficiency of VCG: the costs of construction and operation of VCG installations are considered, as well as possible ways to reduce the cost of energy obtained. The integration of VCG into industry reduces dependence on a single energy source, as it allows the use of different types of fuel, including low-calorie sources. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of VCG, it is concluded that this area has great potential for development, especially in the context of the transition to green energy. Further research and implementation of new technologies, such as flash gasification, can contribute to increased efficiency and cost reduction, ensuring the sustainable development of energy infrastructure

**Keywords:** intra-cycle gasification, biomass, renewable energy sources, synthesis gas, energy efficiency, environmental aspects, economic feasibility.

## Вступ

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) є інноваційною технологією, що дозволяє отримувати енергію з вугілля та інших органічних матеріалів у більш екологічно чистий спосіб порівняно

з традиційними методами спалювання. Ця методика почала розвиватися в середині 20-го століття і з того часу зазнала значних удосконалень [1].

ВЦГ-газифікація почала розвиватися в середині 20-го століття, адже була необхідність у нових джерелах енергії через зростаючі потреби.

Методика ВЦГ дозволила отримати енергію з вугілля у більш екологічно чистий спосіб у порівнянні з традиційними методами спалювання. Технологію вдосконалювали на основі досліджень у сфері термохімії і каталітичних процесів.

## Значення в енергетичному секторі

- ВЦГ має потенціал стати важливим елементом енергетичної інфраструктури, особливо у країнах, де запаси вугілля великі.
- Виробництво електроенергії: Синтез-газ може бути використаний для генерації електричної енергії в турбінах, що забезпечує стабільну та безперебійну роботу.
- Виробництво хімічних продуктів: З синтез-газу можна отримувати різноманітні хімічні сполуки, такі як метанол та аміак.
- Очисні технології: ВЦГ дозволяє зменшити викиди забруднюючих речовин у атмосферу.

## Технологічні переваги

- Ефективність: Завдяки процесам газифікації, вугілля перетворюється на енергію з високим коефіцієнтом корисної дії в порівнянні зі звичайним спалюванням.
- Гнучкість використання: Синтез-газ може бути використаний для різних цілей (енергія, хімія), що підвищує універсальність технології.
- Складна структура: ВЦГ дозволяє інтегрувати різні енергоносії, зменшуючи залежність від одного джерела енергії.

## Екологічні переваги

- Зменшення викидів: Внутрішньоциклова газифікація зменшує викиди CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> і SO<sub>x</sub> порівняно з традиційними методами спалювання вугілля.
- Вторинне використання вуглецю: Синтез-газ може використовуватися для виробництва чистого водню, який є важливою складовою енергетичної транзитивності до безвуглецевих джерел енергії.

**Управління відходами:** Процес дозволяє зменшити обсяг відходів, які залишаються після спалювання вугілля, оскільки енергія отримується безпосередньо з газу [1].

В цілому, внутрішньоциклова газифікація вугілля пропонує значні технологічні та екологічні переваги, що робить її важливою для майбутнього енергетичного сектору, особливо в контексті зменшення викидів парникових газів та переходу до більш сталих джерел енергії.

### Постановка проблеми

Зростаючий попит на енергію та занепокоєння щодо викидів парникових газів вимагають переходу до відновлюваних джерел енергії.

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ), процес перетворення біомаси та інших відновлюваних ресурсів на синтез-газ, є перспективним напрямком для задоволення цього попиту.

Однак, незважаючи на потенціал ВЦГ, її широке впровадження обмежене рядом проблем. Існуючі технології ВЦГ часто мають низьку ефективність перетворення біомаси на синтез-газ, що призводить до втрат енергії та збільшення витрат. Синтез-газ, отриманий в результаті ВЦГ, часто містить домішки, які ускладнюють його подальше використання для виробництва електроенергії, тепла або синтетичного палива.

Будівництво установок ВЦГ є дорогим, що робить їх недоступними для багатьох потенційних користувачів.

Незважаючи на потенціал ВЦГ, дослідження в цій галузі все ще недостатньо розвинені, що ускладнює оптимізацію процесу та розробку нових технологій.

Тому, для впровадження ВЦГ як ефективного та екологічно чистого джерела енергії, необхідно вирішити низку проблем:

- Збільшення ефективності перетворення біомаси на синтез-газ.
- Оптимізація процесу ВЦГ для отримання синтез-газу з бажаним складом.
- Зниження капітальних витрат на будівництво установок ВЦГ.
- Розроблення нових технологій та удосконалення існуючих для підвищення ефективності та екологічності процесу.

### Мета

Стаття має на меті проаналізувати існуючі проблеми ВЦГ та запропонувати можливі шляхи їх вирішення, що сприятиме розвитку цього напрямку для отримання енергії з відновлюваних джерел.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) привертає увагу багатьох вчених, які досліджують її потенціал як ефективного методу отримання енергії з відновлювальних джерел.

Капустянський А.О. провів детальний аналіз процесів ВЦГ, зосереджуючи увагу на оптимізації технологій для підвищення ефективності перетворення біомаси на синтез-газ. Його роботи підкреслюють важливість дослідження складу синтез-газу та його впливу на подальше використання [5].

Запорожець Ю. М. досліджує вплив різних видів сировини на ефективність ВЦГ. Її публікації вказують на те, що вибір сировини може суттєво вплинути на вихід синтез-газу та його якість [6].

Коваленко Т. С. вивчає екологічні аспекти ВЦГ, зокрема, вплив викидів на навколишнє середовище. Її дослідження підкреслюють необхідність розроблення чистих технологій, які можуть зменшити негативний вплив на екологію [7].

Запорожець Ю. М. досліджує впровадження сучасних газотурбінних технологій і комбінованих парогазових установок з використанням вітчизняної техніки, наявних і нетрадиційних паливних ресурсів [8].

Кесова Л. О. досліджує економічні аспекти впровадження ВЦГ в Україні, аналізує капітальні витрати та можливі шляхи зниження витрат на будівництво установок, що робить технологію більш доступною для широкого використання [9].

Гічов Ю. О. досліджує інтеграцію ВЦГ з іншими відновлювальними джерелами енергії, такими як сонячна та вітрова енергія. Його роботи пропонують нові підходи до комбінованого використання різних джерел енергії для підвищення загальної ефективності [10].

Аналіз робіт вчених-дослідників свідчить про те, що внутрішньоциклова газифікація є пер-

спективним напрямком для отримання енергії з відновлювальних джерел. Продовження досліджень у цій галузі допоможе вирішити існуючі проблеми та оптимізувати технології, що, в свою чергу, сприятиме розвитку екологічно чистих джерел енергії.

### Виклад основного матеріалу

Наприкінці 20 століття прогресивний розвиток отримала внутрішньоциклова газифікація для електроенергії тобто. використання бінарного циклу, при якому горючий газ газифікації утилізується в газовій турбіні, а продукти згоряння використовуються при генерації пари для парової турбіни. Перша комерційна електростанція із внутрішньоцикловою газифікацією запущена США у Каліфорнії 1983 року фірмою Col Water. В основі проекту використовувався газогенератор Техасо з подачею палива у вигляді водно-вугільної суспензії, потужністю електростанції до 100 мВт або 60 тонн на годину з вугілля. Далі у 90 роках минулого століття у різних країнах було введено в експлуатацію 18 електростанцій із внутрішньоцикловою газифікацією твердого палива потужністю 60–300 мВт кожна. Підвищений інтерес до внутрішньоциклової газифікації у розвинених країнах викликаний двома факторами: екологічними – при використанні генераторного газу скорочуються викиди оксидів сірки, азотистих сполук та твердих частинок в атмосферу. Друге, економічне – використання бінарного циклу дозволяє збільшити ККД із зменшенням витрати палива на 50% для отримання тієї самої кількості електроенергії. Цілком закономірно, що динаміка використання внутрішньоциклової газифікації збільшуватиметься.

Низька, щодо вартості капітального ремонту, вартість вітчизняного обладнання дасть можливість реконструкції старих потужностей та впровадження нових виробників, що генерують. Технологія буде ще більш привабливою за наявності екологічних обмежень у місцях розміщення через скорочення у 30 разів викидів в атмосферу щодо спалювання вугілля безпосередньо. Також привабливим для потенційних інвесторів буде використання низькокалорійних джерел твердого палива, які користуються малим попитом і не затребувані – буре вугілля, торф, відновлювані

джерела енергії, рослинництва тощо. Надалі буде використано ресурс ТПВ (тверді побутові відходи), які на сьогодні складають близько 20–30 кг на людину щодобово [3].

### Класифікація технологій газифікації

Для сучасної хімічної промисловості та енергетики потрібні газогенератори з одиничною потужністю вугілля 100 т на годину і більше. В основному в промисловій практиці використовують газогенератори Вінклера в киплячому шарі, шарові генератори Лурги з одиничною потужністю по вугіллю 45 т на годину, пилокутні генератори Коперса-Тотцека. Аналіз конструктивних особливостей та принципів роботи сучасних промислових газогенераторів (їх модифікацій понад 10) можна виділити 3 основні конструкції [5].

1. Розробка Фріца Вінклера (концерн BASF) у 1926 р. Газогенератор киплячого шару. Ця технологія стала стимулом для сучасних процесів НТВ (Hoch – Temperatur Winkler) та КRW (Kellogg-Rus-Westinghouse) та ін.

2. Розробка фірми Лурги в 1932 р. шарового газогенератора.

3. Розробка Генріхом Коперсом і Фрідріхом Тотцеком в 1944 р., установка з газифікації вугільного пилу, що працює під тиском 3 мПа і більше. Використання підвищеного тиску для інтенсифікації процесу газифікації реалізовано майже у всіх промислових світових газогенераторах, наприклад, у Китаї газифікатори подібного типу мають робочий тиск до 5.0 мПа. Основний газифікуючий реагент – буре вугілля з рідким шлаковидаленням. Технологія слугувала основою для сучасних процесів газифікації з рідким видаленням золота, реалізованим в апаратах Dectec Shell Prenflo, всі вони розроблені на основі газогенератора Коперса-Тотцека [9].

Були спроби використовувати в газогенераторах зовнішні теплоносії, у тому числі ядерне паливо, газифікацію в розплавах солей, двох щаблів у плазмі тощо.

У сучасності в багатьох країнах, практичне застосування технології газифікації впроваджене у вигляді IGCC (інтегрованої комбінований цикл газифікації – ІКЦГ) – це технологія, яка використовує газогенератор, щоб перетворити вугілля та інші види палива (рис. 1), див. таблицю 1.

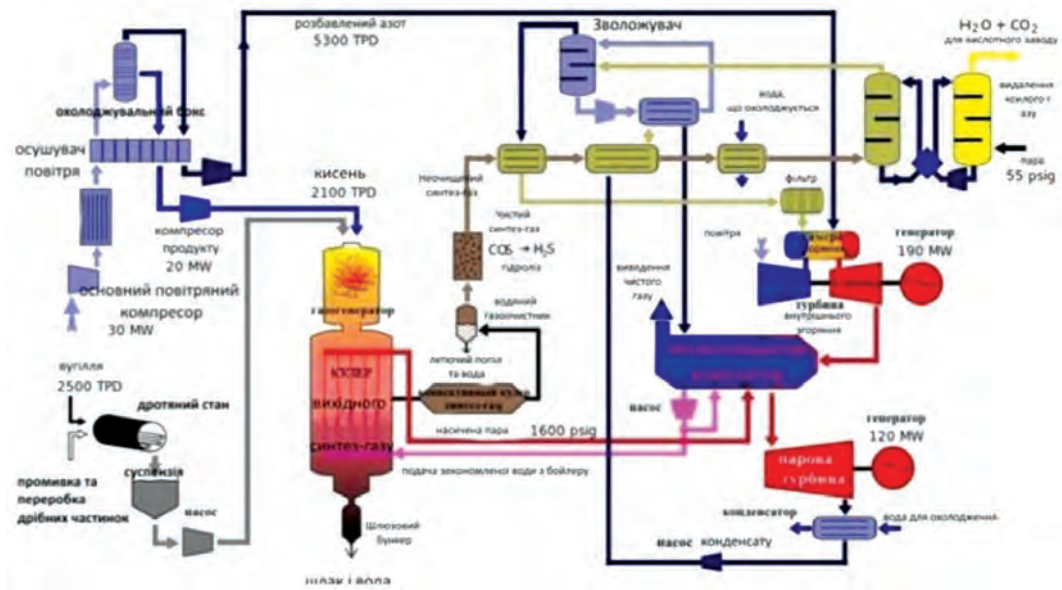


Рисунок 1. Принципова технологічна схема комбінованого циклу комплексної газифікації

Оцінка екологічних та економічних переваг внутрішньоциклової газифікації

Таблиця 1

Порівняльна характеристика технологій газифікації IGCC

Система IGCC	Опис	Основне паливне джерело	Ефективність	Екологічний вплив	Переваги	Недоліки
Стандартна IGCC	Поєднує вугілля з газовою та паровою турбіною	Вугілля	40-45%	Зниження викидів CO <sub>2</sub> з можливістю уловлення	Висока енерго-ефективність	Висока вартість будівництва та експлуатації
Система IGCC з уловленням вуглецю (CCS)	Інтегрує технології газифікації з системами для уловлення вуглецю	Вугілля, біомаса	50-60% з CCS	Дуже низькі викиди CO <sub>2</sub>	Значне зменшення викидів	Додаткові витрати на уловлення та зберігання
IGCC на основі біомаси	Використовує біомасу як основне паливо	Біомаса	30-40%	Зниження викидів CO <sub>2</sub> може бути вуглецево-нейтральним	Спрощує утилізацію відходів	Залежність від сезонних поставок біомаси
Система IGCC з палива	Може працювати з різними видами пального (вугілля, газ)	Вугілля або природний газ	45-50%	Зниження викидів в порівнянні з традиційними технологіями	Гнучкість в використанні видів пального	Потребує адаптації обладнання
Модернізовані IGCC	Включає нові технології для підвищення виробництва енергії	Вугілля, різні види пального	50% і вище	Додаткові знижки на викиди	Висока надійність та стабільність роботи	Необхідність постійного вдосконалення технологій

### Екологічні переваги (таблиця 2):

1. Зменшення викидів забруднюючих речовин: Внутрішньоциклова газифікація вугілля дозволяє значно зменшити викиди CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> і SO<sub>x</sub> у порівнянні з традиційним спалюванням вугілля. Виробництво синтетичного газу (синтез-газу) забезпечує менше забруднення навколишнього середовища.

2. Система очищення газу: Технології газифікації можуть бути інтегровані з системами очищення, такими як уловлення та зберігання вуглецю (CCS), що дозволяє утримувати вуглекислий газ перед його потраплянням в атмосферу.

3. Утилізація відходів: Процес газифікації може ефективно використовувати низькокалорійне вугілля або вугілля низької якості, що зазвичай не підходить для спалювання.

### Економічні переваги:

1. Ефективність енергетичного виробництва: Завдяки високій ефективності конверсії (понад 80%) внутрішньоциклова газифікація може знизити витрати на електричну енергію та збільшити рентабельність проєктів.

2. Гнучкість у використанні пального: Системи газифікації можуть працювати з різними видами пального (вугілля, біомаса), що розширює можливості постачання та знижує цінові ризики.

3. Стимули для інвестицій: Інвестування в нові технології, такі як внутрішньоциклова га-

зифікація, може привести до отримання державних дотацій і знижок, полегшуючи фінансування [11, 12].

Розглянемо окремо продукт, отриманий в процесі газифікації, який має багато потенціалу для використання як альтернативного палива - генераторний газ.

Генераторний газ – це суміш різних газів, які утворюються під час газифікації. Його склад залежить від типу сировини, умов газифікації та технології, що використовується.

### Типовий склад генераторного газу [14]:

- Монооксид вуглецю (CO): Зазвичай становить 20-30% від загального об'єму газу. Це горючий газ, який є основним джерелом енергії в генераторному газі.

- Водень (H<sub>2</sub>): Зазвичай становить 15–25% від загального об'єму газу. Це також горючий газ, який додає теплову цінність генераторному газу.

- Вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>): Зазвичай становить 10-20% від загального об'єму газу. Це негорючий газ, який знижує теплову цінність генераторного газу.

- Метан (CH<sub>4</sub>): Зазвичай становить 1–5% від загального об'єму газу. Це горючий газ, який додає теплову цінність генераторному газу.

- Азот (N<sub>2</sub>): Зазвичай становить 5–15% від загального об'єму газу. Це негорючий газ, який не впливає на теплову цінність генераторного газу.

Таблиця 2

**Порівняння екологічних та економічних показників внутрішньоциклова газифікації з традиційним спалюванням вугілля**

Показник	Внутрішньоциклова газифікація	Традиційне спалювання вугілля
Екологічні викиди CO <sub>2</sub>	Знижені викиди завдяки очищенню	Високі викиди CO <sub>2</sub>
Викиди NO <sub>x</sub> і SO <sub>x</sub>	Низькі викиди, можливість очищення	Високі викиди
Ефективність перетворення	Більш ніж 80%	Зазвичай 30-40%
Використання вторинних пального	Можливість використання різних видів	Обмежене використання пального
Вартість електрики	Може бути нижчою завдяки ефективності	Зазвичай вища через високі витрати
Системи очищення	Інтегровані системи очищення	Часто не існують або є недостатніми

### Використання генераторного газу:

- Генераторний газ може використовуватися в різних сферах:
  - Електроенергетика: Генераторний газ може використовуватися для виробництва електроенергії в газових турбінах або двигунах внутрішнього згоряння.
  - Опалення: Генераторний газ може використовуватися для опалення будівель, промислових об'єктів та інших споруд.
  - Транспорт: Генераторний газ може використовуватися як паливо для двигунів внутрішнього згоряння в транспортних засобах.
  - Хімічна промисловість: Генераторний газ може використовуватися як сировина для виробництва аміаку, метанолу та інших хімічних продуктів.

### Переваги використання генераторного газу:

- Відновлюване джерело енергії: Генераторний газ може бути отриманий з відновлюваних джерел, таких як біомаса, що сприяє зменшенню викидів парникових газів.
- Зниження залежності від викопних палив: Використання генераторного газу може зменшити залежність від викопних палив, таких як вугілля та нафта.
- Зменшення викидів забруднюючих речовин: При правильному використанні генераторний газ може призвести до значного зменшення викидів забруднюючих речовин, таких як оксиди сірки та азоту.

### Недоліки використання генераторного газу:

- Низька теплова цінність: Генераторний газ має нижчу теплову цінність, ніж природний газ, що може вимагати більших обсягів для отримання тієї ж кількості енергії.
- Високі витрати на виробництво: Виробництво генераторного газу може бути дорожчим, ніж виробництво природного газу.

Генераторний газ має великий потенціал для розвитку, особливо в контексті переходу до відновлюваних джерел енергії. Проте, для широкого використання генераторного газу необхідні подальші дослідження та розробки, зокрема в галузі:

Зниження вартості виробництва: Потрібні більш ефективні та економічно вигідні технології газифікації.

Покращення ефективності використання: Потрібні більш ефективні двигуни та системи спалювання, які можуть використовувати генераторний газ.

Зменшення викидів забруднюючих речовин: Потрібні більш ефективні технології очищення генераторного газу [8].

### Дослідження сучасних розробок

У період із 2014–2017рр. українським інженером Володимиром Коваленком за фінансової підтримки китайського інвестора Вана Сяо Фена та участі доктора економічних наук Дмитра Кривошеєва було розроблено та патентовано метод Флеш газифікації (швидкісний) твердих органічних сполук. За основу взято практично всі конструкції газифікаторів, враховано всі їхні недоліки, на основі теоретичних досліджень було зроблено пілотний зразок, потім прототип майбутніх газифікаторів. Метод запатентований в патентному бюро КНР як корисна модель, а потім, як винахід і готовий до впровадження [4].

Пілотні зразки газифікаторів пройшли перевірку. За сировину було взято буре вугілля кількох родовищ Китаю і на базі пілотних зразків побудовано установку-прототип продуктивністю до 300 м<sup>3</sup> на годину по синтезу газу.

Короткі характеристики: час запуску 3 хвилин до виходу на проектну потужність. Так, з 1 т бурого вугілля вихід по газу до 5000 м<sup>3</sup> енергетичного газу при зольності вугілля 10% та вологості 30%, температура газу на виході з газогенератора порядку +67°C, видалення золи сухе, метод газифікації кулястий, температура в реакційній зоні 450–680°C, газифікуючий паровий реагент, повітряний, з кисневою стабілізацією, Склад газу на замовлення споживача: низькокалорійний або середньої калорійності. Склад середньо калорійного газу 3200 ккал м<sup>3</sup>: Н<sub>2</sub> до 48%, ЗІ до 60% у регульованій пропорції.

У залишку СО<sub>2</sub> до 4%, можлива присутність метану. У режимі виробництва технологічного газу азот у складі відсутня. Продуктивність газогенератора до 24000 м<sup>3</sup> за годину одного модуля. Співвідношення пари: вуглець (Н<sub>2</sub>О:С), Макс 1:1, ступінь конверсії 99%, фракційний склад бурого вугілля, діаметром 0,1-30 мм.

Вологість не регламентується до 45%, енергетичні витрати на 1000 м<sup>3</sup> синтез газу 10–15 кВт за годину.

Питомі капітальні витрати на 1 м<sup>3</sup> газу (0,3 кВт теплової енергії) близько 50 USD проти 1500 USD методом Лурги, є тенденції до зниження капітальних витрат до 25 USD.

Порівняльний аналіз методів наведено у таблиці 3.

Максимальний вихід синтезу середньокалорійного газу на 1 т. антрациту становить 9600 м<sup>3</sup> при конверсії вуглецю 99,8%.

Габаритні розміри модуля: діаметр 400–1500 мм. Висота 1000–4500 мм. Продуктивність блоку (в хв.) 12 м<sup>3</sup> – макс 24000 м<sup>3</sup> год, встановлена електрична потужність 0.125–20 кВт [10]. Технологічне обладнання маломатеріаломістке, конструкція комплексу модульна, високотехнологічна.

Примітно, що для стабілізації процесу газогенератора необхідно до 2–5 м<sup>3</sup> кисню на годину. Кисень використовувався 95% з установки концентратора кисню ПСА. Процес автоматизований за трьома параметрами температурної,

Таблиця 3

### Порівняльний аналіз технологій газифікації

Показник	Метод Лурги	Метод Вінклер	Метод Копперс-Тотцек	Метод Коваленко
Продуктивність генератора				
по сухому вуглю, т/ч	40-75	20-35	до 40	10
по сухому газу м <sup>3</sup> / год	75000	60000	50000	24000-56000
Коефіцієнт використання вуглеводню, %	90	85	89	98
ККД газифікації, %	75-85	65-85	65-85	95-98
Температура, °C				
у зоні реакції	750-1100	820-1100	1300-1700	580-680
газу на виході	260-430	900-950	1100-1200	67-88
Час перебування палива в газогенераторі,	≈5000	100-500	≈1	3
Витрата				
вугілля, кг на 1000 м <sup>3</sup> сухого газу	800-650	750-610	660-560	200
кисню, м <sup>3</sup> на 1000 м <sup>3</sup> (CO+H <sub>2</sub> )	210-250	300-350	400-500	1,8-2,5
Вихід сухого газу, м <sup>3</sup> на 1т вугілля	1200-1500	1350-1650 p	1500-1800	2400-3600
Теплота згоряння газу, кДж/м <sup>3</sup>	11900-16300	7500-9400	10300-11700	13200-17100
Склад сухого газу, % (V)				
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> C	25-31	17-22	10-18	5-6,5+0,001
CO	17-25	31-35	50-60	43-65
H <sub>2</sub>	40-42	32-43	29-34	38-51
CH <sub>4</sub>	9-10	0,5-1	0,1	2-2,9
H <sub>2</sub>	0,5-1	1-19	1-2	0

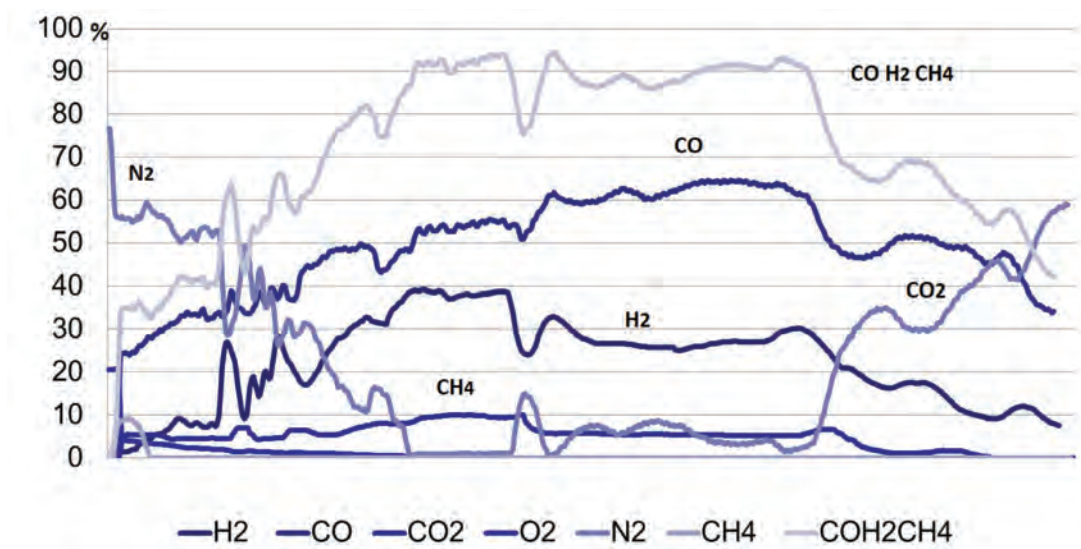


Рисунок 2. Графік роботи флеш газогенератора з інтервалом вимірювання 10 с (час роботи – 3 години) [4]

в діапазоні температур 320–580°C, газової за якістю вихідного газу та тиску на виході комплексу первинне, 0,28 Бар.

Сировиною для газогенератора може бути будь-яка органічна сировина всляке вугілля, торф, деревина, відходи сільськогосподарського виробництва, ТПВ (тверді побутові відходи) тощо.

Для газифікації цих видів сировини необхідна корекція газогенератора на кшталт сировини, одного чи іншого виду.

Особливості генераторів подібного типу, це конструктивно вбудований паровий генератор, що забезпечує себе паром і одночасно стабілізатор температурного режиму всередині газогенератора.

Незалежно від вмісту сірки у складі вуглеводневої сировини газової складової всього 0,012 ppm. З метою скорочення витрат, дисперсна волога з сировини виводиться, уловлюється методом конденсації, очищається і направляється в парогенератор для повторного використання як газифікуючого агента.

Газифікація є основним постачальником синтез-газу нафтохімічної промисловості, для виробництва хімічних добрив, для виробництва водню, органічного синтезу альтернативних видів енергії, диметилвий ефір. Утилізація побутових відходів тощо. Утилізація пластику, відходів сільськогосподарського виробництва Енергетич-

ний газ газогенератора може бути використаний при виробництві металів у металургії.

Так, у сільському господарстві найенергоємніший процес – сушіння зернових, з впровадженням флеш-газифікації, ця проблема вирішується, оскільки сировиною є відходи рослинництва солома, стебла кукурудзи, соняшнику та інших культур.

Найбільш затребуваним напрямком газифікації може бути виробництво електроенергії та виробництво рідких енергоносіїв.

Співвідношення  $H_2O:C$  (пара: вуглець) 1:1 для Флеш газифікації.

Графік роботи флеш газогенератора з інтервалом вимірювання 10 с і зміною параметрів налаштування, зміни видно на провалах експоненти. При збільшенні Азотного параметра пропорційно падають усі параметри газифікації, це дієвим методом управління всього процесу (рис. 2).

Робота газоаналізатора в режимі онлайн вимірів у процесі газифікації, всі параметри вимірів у відсотковому обчисленні.

Для газифікації органічних сполук рослинного походження реактор вводиться ступінь тарифікації, а потім включається режим газифікації.

Основна перевага методу технологічність, відсутність витрат на підготовку сировини під газифікацію, сушіння лише подрібнення до потрібної фракції 1–30 мм, мікс. Вологість сировини не регламентується (рис. 3) [4].



*Рисунок 3. Робота газифікатора та газоаналізатора в режимі онлайн вимірів у процесі газифікації [4]*

### **Визначення потенціалу ВЦГ. Інтеграція нових технологій у промисловість та 4енергетичний сектор [13]**

#### **Використання у відновлювальних джерелах енергії:**

- Флеш-газифікація може бути інтегрована у системи відновлювальної енергетики для перетворення біомаси та відходів в енергію, що допомагає зменшити залежність від викопних джерел енергії.

#### **Синтез-газ як інгредієнт:**

- Синтетичний газ може бути використаний у виробництві хімічних сполук, таких як метанол чи аміак. Це дозволяє розширювати можливості використання газу, з огляду на поточні потреби промисловості.

#### **Зменшення відходів:**

- Завдяки флеш-газифікації відходи можуть бути використані як сировина для енергетики, що дозволяє зменшити обсяг відходів на звалищах і виклики, пов'язані з їх утилізацією.

#### **Підтримка сталого розвитку:**

- Інтеграція флеш-газифікації у промислові процеси та енергетичні системи може сприяти переходу до більш сталих практик, знижуючи вуглецевий слід і забезпечуючи чистіші технології енергетичної генерації.

#### **Економічні перспективи:**

- Впровадження нових технологій може призвести до створення нових робочих місць у сферах досліджень, розробок.

### **Висновки**

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) має значні перспективи та переваги в енергетичному секторі. Основні з них включають високу ефективність перетворення енергії з ККД понад 80%, значне зменшення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, і SO<sub>x</sub> в атмосферу, а також гнучкість у використанні синтез-газу для різних цілей, таких як виробництво електричної енергії та хімічних продуктів. Використання бінарного циклу в комерційних електростанціях знижує витрати палива на 50%, що робить цю технологію економічно вигідною. Інтеграція ВЦГ в промисловість знижує залежність від одного джерела енергії, оскільки вона дозволяє використовувати різні види пального, включаючи низькокалорійні джерела.

В результаті дослідження визначені основні переваги та перспективи масштабного впровадження ВЦГ світовій енергетичній інфраструктурі.

**Екологічність:** Внутрішньоциклова газифікація вугілля демонструє значні екологічні переваги порівняно з традиційними методами спалювання, включаючи зниження викидів оксидів сірки, азоту та часток твердих речовин. Завдяки використанню генераторного газу, ця технологія забезпечує екологічно чистіше рішення для виробництва електроенергії.

**Підвищення конкурентоспроможності:** Завдяки новим технологіям газифікація може стати конкурентоспроможною в порівнянні з традиційними видами палива.

Технологічні інновації: Один із ключових аспектів розвитку газифікації – це інтеграція новітніх технологій, таких як флеш-газифікація. Ці інновації відкривають нові горизонти для використання альтернативних джерел сировини, включаючи буре вугілля, торф, відходи сільського господарства та побутові відходи.

Перспективи розвитку: Урахування зростаючих потреб у зниженні викидів та підвищенні енергоефективності створює сприятливі умови для розширення використання внутрішньоциклової газифікації. Реконструкція існуючих електростанцій та впровадження нових технологій газифікації можуть стати важливими кроками для підвищення енергетичної незалежності та стійкості.

Інтеграція у відновлювану енергетику: Газифікація може стати частиною комплексних рішень у галузі відновлюваної енергетики, особливо у зв'язку з розвитком технологій зберігання енергії.

Необхідність подальших досліджень: Слід підкреслити важливість продовження досліджень у галузі технологій газифікації для освоєння нових сировинних матеріалів, покращення конструкцій газифікаторів та оптимізації процесів. Це сприятиме досягненню максимального виходу синтез-газу та підвищення ефективності всієї системи енергетичного забезпечення.

### Список використаних джерел

1. Дубровський В.І. (2016). Газифікація вугілля: технології та екологічні аспекти. *Енергетика та екологія*, 45(2), 123-130.
2. Chakraborty A., & Parikh J. (2018). Review on gasification technologies and the role of gasifiers in the conversion of solid fuels into gaseous fuels. *International Journal of Energy Research*, 42(5), 1577-1593. [doi:10.1002/er.3823](https://doi.org/10.1002/er.3823)
3. Manousiouthakis V., & Kotsalos A. (2019). Advanced technologies for coal gasification: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, 183, 81-96. [doi:10.1016/j.enconman.2019.01.029](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.029)
4. Kovalenko V. (2017). Флеш-газифікація: нові підходи у перетворенні твердих органічних матеріалів. *Наука та технології*, 2(4), 142-147.
5. Капустянський А.О. (2016) Аналіз діяльності паливно-енергетичного комплексу України / А. О. Капустянський, Г.Б. Варламов // *Вісник ТНТУ*, Т. : ТНТУ, Том 83. № 3. С. 144-153. — (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).
6. Запорожець Ю.М. «Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття, або інтенсивне відновлення». *Наукові праці. Серія: Техногенна безпека* 210.198 (2013).
7. Лис С.С., Юрасова О.Г., Коваленко Т.П.. Розроблення способу газифікації подрібненого вугілля. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2021, т. 31, № 1
8. Кєсова Л.О. Оцінка ефективності впровадження парогазових і ЦКШ-технологій на ТЕС України / Л. О. Кєсова, В. С. Коберник, І. С. Соколовська // *Проблеми загальної енергетики*. - 2018. - Вип. 3. - С. 42-47.
9. Duan P., Wang Y., & Liu J. (2015). Review on the progress of coal gasification technology. *Fuel Processing Technology*, 133, 63-74. [doi:10.1016/j.fuproc.2015.01.004](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.004)
10. Гічов Ю. (2011). Проблеми теорії і технології перетворення і використання енергії. *Дніпропетровськ НМетАУ*.
11. Zhang Z., Wang X., & Liu Y. (2020). The development and application of integrated gasification combined cycle technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109925. [doi:10.1016/j.rser.2020.109925](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109925)
12. Barton P.I., & Reay D. A. (2017). A review of the gasification of biomass: The socio-economic and environmental issues. *Energy Reports*, 3, 353-374. [doi:10.1016/j.egy.2017.03.002](https://doi.org/10.1016/j.egy.2017.03.002)
13. Röder D., & Mohr M. (2018). Technological advancements in gasification for the production of hydrogen from coal and biomass. *Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4096-4109. [doi:10.1016/j.ijhydene.2018.01.179](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.179)
14. Sarvaš J. (2018). The potential of biomass gasification to generate renewable energy: A state-of-the-art review. *Renewable Energy*, 129, 565-578. [doi:10.1016/j.renene.2018.02.097](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.097)
15. Energy & Fuels. Видані статті з 1987 року. *Energy & Fuels* Bennett, James P. «Slag Management of Carbon Feedstock Used in Gasification FY17 TCF between Eastman Chemical and NETL (Final Report)», Jan. 2020. <https://doi.org/10.2172/1643442>

## ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

**Бондарчук Василь Миколайович** (м. Житомир) – старший викладач. Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б. Б. Самотокаїна. Державний університет «Житомирська політехніка».

ORCID: 0000-0003-2793-8720

**Валерко Руслана Анатоліївна** (м. Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент. Кафедра екології та природоохоронних технологій. Державний університет «Житомирська політехніка». ORCID: 0000-0003-4716-0100

**Власенко Олег Васильович** (м. Київ) – аспірант, науковий співробітник. Кафедра екологічного аудиту та технологій захисту довкілля. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

ORCID: 0000-0001-9802-0322

SCOPUS: 59266912500

**Герасимчук Людмила Олександрівна** (м. Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент. Кафедра екології та природоохоронних технологій. Державний університет «Житомирська політехніка».

ORCID: 0000-0002-3166-5588

SCOPUS: 57311745500

**Грицуляк Галина Михайлівна** (м. Івано-Франківськ) – доктор сільськогосподарських наук, доцент. Кафедра ТЗБП. Івано-Франківський національний університет нафти і газу.

ORCID: 0000-0003-2463-4772

SCOPUS: 57205763013

**Громова Інна Юріївна** (м. Київ) – кандидат технічних наук, доцент. Кафедра екологічного аудиту та експертизи. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

ORCID: 0000-0001-7869-1129

**Д'яченко Наталія Олександрівна** (м. Київ) – кандидат геологічних наук. ДУ «Науковий центр гірничої геології, геоєкології та розвитку інфраструктури НАН України».

ORCID: 0000-0002-4852-0203

SCOPUS: 57209985970

**Демчук Людмила Іванівна** (м. Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент. Кафедра екології та природоохоронних технологій. Державний університет «Житомирська політехніка».

ORCID: 0000-0001-5698-711

**Іващенко Тарас Григорович** (м. Київ) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник. Кафедра екологічного аудиту та технологій захисту довкілля. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

ORCID :0000-0001-6749-1009

Web of Science: doi:

<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.1>

<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.34>

[https://doi.org/10.15589/smi2020.1\(13\).7](https://doi.org/10.15589/smi2020.1(13).7)

<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.10>

**Кірейцева Ганна Вікторівна** (м. Житомир) – кандидат економічних наук, доцент. Кафедра екології та природних технологій.

Державний університет «Житомирська політехніка».

ORCID: 0000-0002-1055-1784

SCOPUS: 55945014200

**Ковальова Світлана Петрівна** (м. Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник; завідувачка відділу тваринництва та екологічної безпеки земель і якості продукції, Інститут сільського господарства Полісся НААН України.

ORCID: 0000-0003-1858-625X

**Коцюбинський Андрій Олегович** (м. Івано-Франківськ) – кандидат фізико-математичних наук, доцент. Івано-Франківський національний університет нафти і газу.

ORCID: 0000-0003-1135-3568

**Кравчук-Ободзінська Таїса Валеріївна** (м. Житомир) – асистент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID: 0000-0002-1898-2837

**Маркіна Людмила Миколаївна** (м. Київ) – доктор технічних наук, професор кафедри екологічного аудиту та технологій захисту довкілля. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

ORCID: 0000-0003-3632-1685

SCOPUS: 57190403872

Web of Science: AАН-4702-2020

**Машков Олег Альбертович** (м. Київ) – доктор технічних наук, професор. Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

**Медвідь Олександр Володимирович** (Житомир) – асистент, аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка».

**Можарівська Інна Анатоліївна** (м. Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри здоров'я природи та якості харчових ресурсів, Державний університет «Житомирська політехніка».

ORCID: 0000-0003-0564-4457

**Оводенко Тамара Сергіївна** (м. Київ) – аспірант. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

**Павлюх Л. І.** (м. Київ) – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри екології Державного університету «Київський авіаційний інститут».

ORCID.ORG/0000-0002-7715-4601,

e-mail: lesia.pavliukh@npp.nau.edu.ua

**Пацева Ірина Григорівна** (Житомир) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка».

**Печений Володимир Леонідович** (м. Київ) – доктор філософії. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

**Присяжний Володимир Ілліч** (м. Київ) – кандидат технічних наук. Національне космічне агентство.

**Радомська Маргарита Мирославівна** (м. Київ) – кандидат технічних наук. Кафедра екології. Державний університет «Київський авіаційний інститут».

ORCID: 0000-0002-8096-0313

SCOPUS: 57219056934

**Репета В. К.** (м. Київ) – кандидат фізико-математичних, доцент кафедри вищої математики Державного університету «Київський авіаційний інститут»

ORCID.ORG/0000-0002-5615-7889,

e-mail: victor.repeta@npp.nau.edu.ua

**Рибак Оксана Сергіївна** (Житомир) – аспірант. Факультет гірничої справи, природокористування та будівництва Державний університет «Житомирська політехніка».

**Русецька Наталя** (м. Житомир) – спеціаліст вищої кваліфікаційної категорії, викладач природничих дисциплін. Житомирський агротехнічний коледж.

**Улицький Олег Андрійович** (м. Київ) – доктор геологічних наук, професор. ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

Профіль Google Академія (h-індекс - 6):

ORCID: 0000-0003-2674-2208

**Lesia Pavliukh**, PhD, Professor of the Environmental Science Department State University «Kyiv Aviation Institute»

ORCID.ORG/0000-0002-7715-4601,

e-mail: lesia.pavliukh@npp.nau.edu.ua

**Устименко Володимир Ігорович** (м. Житомир) – доктор філософії, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID: 0000-0001-7633-2130

**Victor Repeta**, PhD (Mathematics), Associate Professor of the Higher Mathematics Department State University «Kyiv Aviation Institute»

ORCID.ORG/0000-0002-5615-7889,

e-mail: victor.repeta@npp.nau.edu.ua

**Шевченко О. Є.**

Національний транспортний університет

**Яцишин Теодозія Михайлівна** (м. Івано-Франківськ) – доктор технічних наук, професор. Івано-Франківський національний університет нафти і газу. Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України.

ORCID: 0000-0001-7723-2086V

---

Редакція журналу також вдячна авторам які прийняли участь у підготовці чергового номеру: Головачу А. Г., Гуз В. В., Пашкевич Л. П., Присяжному В. І., Рижову Г. О., Лінник Д., Філіну В. В.

Ми щиро вдячні кожному з вас за внесок у нашу спільну справу

---

## ВИМОГИ ДО ЗМІСТУ СТАТТІ

### *наукового журналу «ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ»*

затверджено в Переліку наукових фахових видань рішенням Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України (категорія Б) (наказ №894 від 10. 10. 2022 р.)

Обсяг статті не менше 10-15-ти повних сторінок.

Структура статті має відповідати вимогам до наукових статей й складатися з таких частин:

- УДК;
- назва статті;
- прізвище автора (авторів), науковий ступінь, назва кафедри, посада, назва установи (організації) та міста;
- контакти автора (телефон, електронна адреса);
- анотація **1800** знаків без пробілів;
- ключові слова;
- загальна суть проблеми;
- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- формулювання мети статті;
- виклад основного матеріалу;
- висновки;
- список використаної літератури

Статті публікуються українською, англійською, польською або російською мовами.

Автор зазначає рубрику, в якій публікується стаття, індекс за універсальною десятковою класифікацією. В кінці статті наводить повну назву організації, де виконане дослідження, свою поштову і електронну адресу та номер телефону та ID SCOPUS/ORCID.

Фізичні величини наводяться в одиницях СІ.

Повна назва статті, анотація, ключові слова, а також написання прізвищ додаються українською, англійською, польською або російською мовами.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

1. Текстовий редактор – Word for Windows.
  2. Розмір сторінки: А4, 210x297.
  3. Поля: верхнє, лівє, правє – 1,5 см, нижнє – 1,7 см.
  4. Розмір шрифту «Times New Roman».
    - Для УДК – 10 кегель, великі літери, жирний шрифт.
    - Для заголовку статті 10 кегель, великі літери, жирний шрифт.
    - Для прізвища авторів – 10 кегель, жирний шрифт.
    - Для назви організації і міста – 10 кегель, нормальний шрифт.
    - Для анотації, ключових слів (3-4 рядки через 1 інтервал) 10 кегель, жирний шрифт.
    - Для заголовків розділів в тексті – 10 кегель, жирний шрифт.
    - Для основного тексту – 10 кегель, нормальний шрифт.
    - Для переліку використаних джерел (через 1 інтервал, слово Література) – 9 кегель, нормальний шрифт.
  5. Текст друкується через 1 інтервал і вирівнюється на ширину листа.
  6. Абзацний відступ від основного тексту – 0,5 см.
  7. УДК, прізвище (-а) автора (-ів), назва статті, рядки тексту анотації, номери джерел вирівнюються по лівому краю сторінки.
  8. Формули необхідно друкувати по центру, нумерація формул в кінці рядка.
  9. Розмір формул такий: основний . – 12; крупний індекс –7; дрібний індекс – 5; крупний символ – 18; дрібний символ – 12.
  10. Якщо рисунок один чи таблиця одна на статтю, то підпис здійснюється «Рисунок. Назва» чи відповідно «Таблиця», а продовження «продовження таблиці». Якщо декілька, то «Рис.1. Назва» чи відповідно «Таблиця 1», а продовження «продовження табл. 1».
  11. Між рядком з вказаним індексом УДК і рядком з прізвищем автора (-ів), рядком з прізвищем автора (-ів) та назвою, назвою та анотацією, анотацією та текстом, текстом та переліком джерел – віддаль повина бути в 2 інтервали.
  12. Переноси в назві статті не допускаються.
  13. Нумерований перелік літератури подати в кінці статті одним абзацем, через крапку і оформлюється згідно ДСТУ 7,1:2006 (див. Бюлетень ВАК України №3, 2008). Нумерація джерел йде підряд і номер джерела виділяється жирним шрифтом. В переліку повинна вказуватись сучасна англійська література з ретроспективою не більше 5 років.
- До статті подається рецензія від фахівця з науковим ступенем доктора наук і витяг з протоколу засідання кафедри про рекомендацію статті до друку.

*Довідково* (інтернет ресурси):

<https://vak.in.ua/>

<https://www.grafiati.com/uk/info/dstu-7-1-2006/examples/>

[https://www.narodnaosvita.kiev.ua/?page\\_id=105](https://www.narodnaosvita.kiev.ua/?page_id=105)

<http://www.ukrbook.net/biblzak.html>

[http://www.library.ukma.edu.ua/fileadmin/documents/Bibliography/26\\_DCTU3582-97.pdf](http://www.library.ukma.edu.ua/fileadmin/documents/Bibliography/26_DCTU3582-97.pdf)

[«Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України» від 15 січня 2003 № 7-05/1.](#)

[Онлайн-конвертер з української мови для транслітерації: http://translit.kh.ua/?passport](http://translit.kh.ua/?passport)

Для транслітерації латиницею україномовних текстів можна скористатися програмами на відповідних сайтах: <http://litopys.org.ua/links/intrans.htm>

**ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання»**  
ДСТУ 3582-97  
ДСТУ 7.1:2006

## **Екологічна безпека та технології захисту довкілля**

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

Тел: +380980625787  
(контактна особа-Печений Володимир)

Corporation\_office@ukr.net  
<https://ecocorptzd.com.ua>  
<https://facebook.com/SIAS.Techecosafety/>