

**МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ
УКРАЇНИ**

**НАУКОВО-ДОСЛІДНА УСТАНОВА
«УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ»**

XXI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА:
ПРОБЛЕМИ І ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ

25-26 вересня 2025 р.
м. Харків, Україна

Харків 2025

УДК 502.58:504.064.4

Електронний примірник.

Розміщено на офіційному сайті згідно рішення Вченої ради УКРНДІЕП

Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей
XXI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків,
25-26 вересня 2025 р.) / УКРНДІЕП., 2025. — 429 с.

У збірнику наукових статей висвітлено проблеми, що пов'язані з регіональною екологією, охороною атмосферного повітря та водних об'єктів, переробкою промислових та побутових відходів, моніторингом навколишнього природного середовища, радіоекологічною безпекою та екологічно чистими енергозберігаючими технологіями.

Збірник розраховано на вчених та спеціалістів академічних та галузевих науково-дослідних і проектних інститутів, керівників підприємств різних форм власності, організацій МОЗ України, представників департаментів екоресурсів обласних та міських державних адміністрацій та екологічних інспекцій, управлінь з питань надзвичайних ситуацій, органів державної виконавчої влади та місцевого самоврядування і громадських організацій.

Статті надруковано за авторською редакцією.

© Укладач Науково-дослідна установа
«Український науково-дослідний
інститут екологічних проблем»
(УКРНДІЕП), 2025

ЗМІСТ

Гриценко А. В., Васенко О. Г., Лук'янова О. О.

Основні екологічні проблеми, що висвітилися при підготовці Національної Доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2024 році 9

**Гриценко А. В., Цапко Н. С., Маркіна Н. К., Калініченко О. О.,
Мельников А. Ю.**

Екологічні і соціально-економічні наслідки вибуху нафтобази під час бомбардування м. Харкова, визначені за підтримки дитячого фонду ООН (ЮНІСЕФ), рекомендації щодо їх подолання та шляхи їх подолання..... 12

Авдієнко І. А., Юрченко В. О.

Проблема викидів парникових газів на міських спорудах очищення стічних вод. 25

Адамова Г. В., Пісня Л. А.

Екологічна інтеграція України у транспортне планування країн ЄС 30

Аніщенко Л. Я., Пісня Л. А., Свердлов Б. С., Барміна І. В.

Особливості експертних процедур для управління екологічною безпекою з використанням методу аналізу ієрархій..... 38

Барбашев С. В., Андрєєв Е. В.

Безперервний моніторинг тритію у зовнішніх скидних комунікаціях АЕС, як гарантія стабільної і безпечної роботи станції..... 50

Бєлоконь К. В., Книрік В. В., Аданік О. О.

Методи знешкодження високомінералізованих стічних вод..... 58

Бєлоконь К. В., Розсоха К. В., Зубко Ю. Г.

Екологічна небезпека полігонів твердих побутових відходів..... 63

Борисенко О. М., Логвінков С. М., Іщенко А. М., Ареф'єв В. О.

Аналіз перспективних складів та технологічних рішень виробництва периклазошпінельних вогнетривів..... 66

Бредіхіна В. Л.

Деякі організаційно-правові питання забезпечення радіоекологічної безпеки в сучасних умовах..... 69

Булавіна Д. А., Гожа М. М., Савцова О. В.

Склокерамічні матеріали як ефективні матриці для іммобілізації радіоактивних відходів..... 74

Васенко О. Г., Ісвлєва О. Ю.

Результати комплексного екологічного моніторингу довкілля української частини дельти Дунаю у першому півріччі 2025 року..... 79

Васенко О. Г., Старко М. В.

Загальна екологічна характеристика Основ'янської водойми, де здійснюється видобуток піску..... 86

Васенко О. Г., Черба О. В.

Сучасний стан та перспективи розвитку рибної галузі..... 94

Васютинська К. А., Перекрест А. Л., Вадурін К. Л., Корцова О. Л.

Аналітична система для управління екологічними ризиками урбанізованих територій на основі даних моніторингу повітря 102

Волошин В. С.

Використання металургійних відходів для виробництва геополімерів..... 109

Волошин В. С.

Роль термодинамічної нерівноважності в конкуренції за планетарні екосистеми 116

Волошин В. С., Азархов О. Ю.

Перехідні ентропійні процеси на межі властивостей у деяких екосистемах..... 126

Волошин В. С., Азархов О. Ю.

Про один порівняльний критерій по відношенню до конкурентоспроможності деяких природних та штучних екосистем..... 134

Волошин В. С., Бурко В. А.

Інвертні механізми мінімізації промислових теплових відходів у технологічних процесах..... 142

Волошин В. С., Бурко В. А.

Про виконання ст. 4 EWS ES в українському природозахисному законодавстві. Принципи класифікації..... 151

Волошин В. С., Бурко В. А.

Оцінка якості додаткової енергії для управління механізмами мінімізації відходів в технологічних процесах..... 160

Волошин В. С., Бурко В. А.

Щодо енергетичних умов для подолання принципу термодинамічної двоєдності, як механізму створення промислових відходів..... 169

Волошин В. С., Данилова Т. Г. Альтернативні моделі подієвих ризиків для екологічних систем.....	177
Волошин В. С., Єлістратова Н. Ю., Бурко В. А. Особливості мінімізації відходів у технологічному процесі виробництва хліба...	183
Волошин В. С., Ткаленко І. Методика оцінки взаємодії металургійних відходів при їх рециклінгу.....	191
Галайко Б. Ю. Економічна оцінка заподіяної шкоди ґрунтам Харківщини в результаті агресії росії.....	203
Ihor O. Honcharenko, Maryna Oskina Scientific justification of approaches to enhance the environmental safety of thermal power plants when using agricultural waste as a fuel.....	208
Горишнякова Я. В., Пилипенко Л. В., Мар'єнко О. С., Волков Ю. В., Нікітіна С. В. Дослідження та оцінка екологічного стану ґрунтів в зоні впливу вибуху та пожежі на нафтобазі в результаті ракетних обстрілів м. Харкова.....	215
Гуріна Г. І., Кот А. Г., Апалькова В. Є. Сучасні тренди створення екологічно безпечних лакофарбових покриттів.....	225
Дмитрієва О. О., Нещерет І. М., Лисов Б. В., Мельник Л. В. Іноваційний підхід до локальних рекреаційно-мандрівних практик.....	228
Дмитрієва О. О., Цапко Н. С., Лисов Б. В., Мовчан Ю. О. Оцінювання процесів евтрофування водних об'єктів з використанням методів дистанційного зондування землі (ДЗЗ).....	231
Дудар Т. В., Беленок В. Ю., Дубик О. М., Бондар Д. С., Дудар В. В., Титаренко О. В., Топольницький М. В. Активізація розвитку екзогенних геологічних процесів у районах функціонування об'єктів критичної інфраструктури.....	240
Душкін С. С. Огляд онлайн-ресурсів для моніторингу стану довкілля: практичний інструментарій для студентів-екологів.....	247
Забара І. І. Біоценоз активного мулу в аеротенках каналізаційних очисних споруд м. Суми..	255

Зінченко І. В., Густавсон І. А., Кононенко К. С.

Піновикнення у стічних водах шкіряної промисловості: експериментальна оцінка засобів запобігання..... 261

Ivashura A. A.

Analysis of contemporary solutions for minimizing plastic pollution during 2020–2025 and identification of future research directions..... 267

Ivashura A. A.

Regional environmental challenges and priorities for sustainable recovery in Ukraine..... 274

Калініченко О. О., Мельников А. Ю., Нікітіна С. В., Волков Ю. В., Мартинюк Д. Т.

Проблеми визначення та нормування біодоступних форм забруднюючих речовин в ґрунтах..... 279

Квасов П. В., Продащук М. В., Кім К. В., Продащук С. М.

Адаптація систем дощового водовідведення на залізничних вокзалах до сучасних кліматичних змін..... 287

Клімов О. В., Надточій Г. С., Клімов Д. О., Гайдріх І. М., Філатова О. В.

Стан збереження біологічного різноманіття на території Харківської області..... 290

Клочко Т. О., Коваленко С. Ю., Брук В. В., Сломчинська Н. В.

Застосування дистанційної інформації для визначення екологічної шкоди та збитків..... 293

Kovalenko S. Yu., Ponomarenko R. V., Tretyakov O. V.

Improvement of the methodology for comprehensive assessment of the ecological status of surface water bodies..... 299

Лебьодкін Є. О., Варламов Є. М., Палагута О. А., Лебьодкін О. І.

Моделювання концентрацій PM_{10} у зимовий період у м. Кривий Ріг за допомогою моделі Random Forest..... 306

Ленцов І. А., Хлєстов Г. І.

Застосування штучного інтелекту для моніторингу та контролю стану навколишнього природного середовища у металургійній промисловості: аналіз кореляції для розробки цільових заходів..... 320

Малий Д. К., Дудар Т. В.

Сучасні дистанційні методи моніторингу якості атмосферного повітря в Україні: супутникові платформи та БПЛА..... 326

Мельнікова О. Г., Юрченко В. О., Багмут Л. Л.

Технології сталого міського водовідведення для управління поверхневими стічними водами у м. Харків..... 333

Миргород О. В., Пирогов О. В., Рудаков С. В.

Застосування сендвич-панелей при будівництві виробничих будинків та суспільних будівель..... 341

Окольнічий К. М.

Боротьба з радоном у житловому секторі..... 344

Полозенцева В. О., Юрченко А. І.

Сучасні методи прогнозування утворення поверхневого стоку з сільськогосподарських угідь та їх порівняльний аналіз..... 349

Свєтош В. Ю.

Екологічно чисті технології на залізничному транспорті, як ключ до сталого розвитку..... 356

Солодовнікова Л. М., Тарасов В. О., Маркіна Н. К.

Радононебезпека підземних захисних споруд та підземних шкіл..... 360

Стеблєва А. В.

Рециклінг відходів будівництва та демонтажу..... 367

Serhii Telyma, Olexandr Diatel

About the oxygen influence on the efficiency of the wastewater's treatment from organic pollutions in bioreactors..... 372

Трикоз Л. В., Сташко М. В.

Переробка відходів мінеральної вати з будівельних конструкцій: нові можливості для сталого розвитку..... 377

Фалєєв Ф. Р.

Аналіз впливу відновлюваних джерел енергії та електричного транспорту на покращення стану атмосферного повітря..... 383

Хабарова Г. В., Коваленко Г. Д., Барбашев С. В.

Дистанційний моніторинг лісових пожеж в умовах війни у Харківській області... 388

Olha Khliestova, Michal Petrů, Katarzyna Los

Study of thermal conductivity of a waste textile material with air contamination..... 396

Христич О. В., Корогодська А. М.

Використання відпрацьованих каталізаторів у сировинних сумішах спеціальних цементів..... 401

Черкашина М. К., Соколова А. К.

Правове регулювання водоочистки промислових стічних вод в Україні..... 404

Чумаченко С. М., Мацько П. І.

Екологічні аспекти техногенної безпеки критичної інфраструктури сил оборони України в умовах збройної агресії..... 409

Шмонін Є. О.

Штучний інтелект - як технологія моніторингу та контролю стану довкілля..... 417

Яковлєва П. А., Єфімов О. О., Савцова О. В., Суліма Є. О.

Екологічний захист інфраструктурних об'єктів від мікробіологічних загроз..... 422

Yaroshenko D. R., Radomska M. M.

The role of green areas in reducing heat stress in urban environments..... 427

Гриценко А. В., д-р геогр. наук, проф.;

Васенко О. Г., канд. біол. наук, доц.;

Лук'янова О. О., наук. співр.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ОСНОВНІ ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ, ЩО ВИСВІТИЛИСЯ ПРИ ПІДГОТОВЦІ НАЦІОНАЛЬНОЇ ДОПОВІДІ ПРО СТАН НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА В УКРАЇНІ У 2024 РОЦІ

Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні є щорічним аналітичним виданням, що відображає поточний стан довкілля, основні екологічні тенденції та результати реалізації природоохоронної політики.

У Національній доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2024 рік на основі наявних відкритих даних здійснюється комплексний аналіз поточного стану та змін у сфері охорони довкілля, зокрема, атмосферного повітря, водних і земельних ресурсів, рослинного та тваринного світів, а також впливу антропогенної діяльності на довкілля за окремими секторами економіки. Окреслюються основні засади та напрямки реалізації державної екологічної політики, а також заходи, впроваджені впродовж року органами виконавчої влади та природоохоронними організаціями.

Проаналізовано стан та динаміку змін щодо забруднення атмосферного повітря, водних, земельних ресурсів, збереження біологічного та ландшафтного різноманіття, розвитку природно-заповідного фонду та формування національної екомережі, поводження з відходами, впливу промисловості, енергетики, транспорту на стан довкілля та здоров'я населення. Висвітлено ключові напрями діяльності державних органів у сфері охорони довкілля, взаємодію з громадським сектором, розвиток екологічної освіти, а також наведено результати наукових досліджень, спрямованих на вирішення актуальних екологічних проблем і реалізацію міжнародного співробітництва.

Окрему увагу приділено впливу бойових дій на стан навколишнього середовища в Україні. В Національній доповіді за 2024 рік аналізується характер збитків та обсяги шкоди, що була заподіяна довкіллю внаслідок російської військової агресії проти

України.

Вплив війни на довкілля призвів до загострення екологічної ситуації, погіршення стану природних екосистем, зміні ландшафтів, гідрологічного режиму, хімічного та промислового забруднення, зменшення біорізноманіття.

Основною проблемою в підготовці Національної доповіді за 2024 рік є недоступність до багатьох джерел даних через введення воєнного стану в Україні та згідно Закону України «Про захист інтересів суб'єктів подання звітності та інших документів у період дії воєнного стану або стану війни». В умовах воєнного стану частина інформації може бути віднесена до інформації з обмеженим доступом. Існують також проблеми зі збором та систематизацією даних, особливо на територіях, що окуповані та де ведуться бойові дії.

Матеріали для підготовки розділів Національної Доповіді за 2024 рік надали 7 міністерств, 27 державних установ, серед яких 3 академії, 2 науково-дослідні інститути.

Основні результати аналізу наданих матеріалів в Національній доповіді за 2024 рік наступні:

- згідно відомостей сайту Всесвітньої метеорологічної організації, 2024 рік виявився найтеплішим на всій планеті;
- у той же час протягом весни на території України траплялися приморозки, які негативно вплинули на урожай плодових дерев та городи;
- наявність у викидах від пересувних і стаціонарних джерел речовин з синергізмом шкідливої дії. До найбільших шкод можна віднести: влучання ракет у цистерни з хімікатами, в об'єкти нафтової та енергетичної інфраструктури або в об'єкти, що містять токсичні хімічні речовини (склади, на яких зберігаються високотоксичні відходи, промислові об'єкти). Внаслідок виникаючих пожеж у великих об'ємах виділяється чадний газ. Разом із димовими газами в атмосферне повітря попадають забруднюючі речовини та утворюються під час згоряння вуглеводневого палива канцерогенні та мутагенні сполуки.
- екологічні умови залишаються одними із головних факторів впливу на здоров'я людини;
- несприятливі метеорологічні зміни посилюють негативні впливи щодо забруднення природного середовища;
- основними джерелами забруднення атмосферного повітря у 2024 році та викидів канцерогенних газів залишаються підприємства теплоенергетики, добувної та переробної промисловості, коксохімії, сільського господарства та автотранспорту.

У 2024 році Україна продовжила активну реалізацію євроінтеграційних реформ у сфері охорони навколишнього природного середовища. Ухвалено низку нормативно-правових актів, спрямованих на гармонізацію національного законодавства з екологічними стандартами Європейського Союзу. Уряд України продовжив реалізацію євроінтеграційних екологічних реформ відповідно до зобов'язань у рамках Угоди про асоціацію з Європейським Союзом, керуючись положеннями Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» та Закону України «Про стратегічну екологічну оцінку». Пріоритетними напрямками природоохоронної діяльності залишаються забезпечення хімічної та біологічної безпеки, удосконалення державної системи управління відходами, розвиток механізмів оцінки впливу на довкілля та стратегічної екологічної оцінки, впровадження сучасної кліматичної та водної політики, а також запобігання промисловому забрудненню й охорона біорізноманіття.

Інформація, що подана в Національній доповіді, сприятиме підвищенню екологічної обізнаності населення, розвитку екологічної культури та формуванню стратегій сталого розвитку, орієнтованих на зниження антропогенного впливу на природні ресурси.

Попри складні умови, уряд країни у 2024 році послідовно впроваджує реформи, спрямовані на екологізацію економічних і соціальних процесів. Особлива увага приділяється виконанню загальноєвропейських стратегій щодо збереження біологічного та ландшафтного різноманіття, а також дотримання принципів відповідальності за екологічний стан України в майбутньому.

Гриценко А. В., д-р геогр. наук, проф.;

Цапко Н. С., канд. техн. наук, доц.;

Маркіна Н. К.;

Калініченко О. О.;

Мельников А. Ю. канд. техн. наук

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ЕКОЛОГІЧНІ І СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ ВИБУХУ НАФТОБАЗИ ПІД ЧАС БОМБАРДУВАННЯ м. ХАРКОВА, ВИЗНАЧЕНІ ЗА ПІДТРИМКИ ДИТЯЧОГО ФОНДУ ООН (ЮНІСЕФ), РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ ПОДОЛАННЯ ТА ШЛЯХИ ЇХ ПОДОЛАННЯ

В лютому 2024 року ворожими БПЛА (Російською Федерацією) була атакована нафтобаза в м. Харкові, на якій зберігалось більше 3800 тон паливно-мастильних матеріалів. В результаті вибуху з наземних резервуарів відбувся витік майже 3000 тон дизельного палива, бензину та їх загоряння. Суміш палива з талим снігом потрапила в р. Немишля. Це спричинило забруднення не лише р. Немишля, а й річок Харків, Лопань та Уди. Крім того, нафтопродуктами були забруднені ґрунти на території ущільненої житлової забудови. Природоохоронні заходи, які в критичний період запроваджували міська адміністрація Харкова, адміністрація Немишлянського району, наукові установи Харкова і інші, забезпечили перехід критичного забруднення довкілля в стадію хронічного забруднення.

Для забезпечення екологічно прийнятних умов проживання населення, особливо дітей, перед науковцями постало питання щодо визначення інтенсивності та масштабів наслідків вибуху нафтобази. Вирішення цієї проблеми можливе лише шляхом проведення моніторингу і отримання інформації для оцінки поточного стану підземних і поверхневих вод, ґрунтів, донних відкладень р. Немишля та соціально-економічних умов проживання постраждалого від вибуху населення.

Враховуючи, що в таких умовах проживають діти, Дитячий фонд Організації Об'єднаних Націй (далі ЮНІСЕФ) надав підтримку Науково-дослідній установі «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» у здійсненні заходів, пов'язаних із зниженням техногенного навантаження на ґрунти і водоносний горизонт ґрунтових вод шляхом проведення дослідження та моніторингу впродовж

гідрологічного року (з 10.06.2024 р. до 09.06.2025 р.).

Згідно з робочим планом ЮНІСЕФ, в рамках меморандуму від 09 липня 2024р № UKR/MOU 2024405 з UNICEF representative UKRAINE була запланована співпраця в проведенні хіміко-аналітичних досліджень проб ґрунтів; контролю за рівнем їх забруднення; встановлення глибини проникнення нафтопродуктів в зоні аерації; встановлення можливості та масштабів проникнення нафтопродуктів з ґрунтів зони аерації в підземні водоносні горизонти.

Оцінка забруднення компонентів природного середовища, які постраждали від вибуху нафтобази в Немишлянському районі Харкова, станом на липень – грудень 2024 року та січень - квітень 2025 року (періоди літньої, осінньої, зимової межени та весняного повіддя) виконувалася шляхом організації та проведення моніторингу водного середовища, ґрунтів та донних відкладень р. Немишля /1/. Результати моніторингових досліджень слугували екологічною основою для забезпечення цивільного захисту в умовах катастрофічної ситуації, яка склалася в Немишлянському районі Харкова / 2/.

Одержані результати польових вишукувань, хіміко-аналітичних та соціологічних досліджень, проведених в складі моніторингу, дозволили оцінити екологічні та соціально-економічні наслідки зазначеної катастрофи. Масштабність і шкода від забруднення довкілля визначалися за рівнем небезпеки екологічних та соціально-економічних наслідків, а також за рівнем можливості повоєнного відновлення уражених територій.

Екологічні наслідки вибуху нафтобази

Моніторингові дослідження проводились для визначення інтенсивності забруднення нафтопродуктами і важкими металами підземних і поверхневих вод, донних відкладень р. Немишля та ґрунтів зони аерації на різних глибинах. Забрудненість оцінювалася за даними щодо солевмісту, вмісту нафтопродуктів, важких металів (*марганцю, бору, барію, нікелю, свинцю, кадмію та цинку*). Ґрунти, крім того, досліджувалися щодо радіаційного забруднення (показники дози *гама*- і *бета*-випромінювання).

Проби відбиралися на вулицях, які знаходились в епіцентрі вибуху, або прилеглих до епіцентру, що найбільше постраждали від вибуху і пожежі. Це вулиці Заповідна, Танкова, Плідна, Котельна, Ясенева, 1-й Плідний провулок, Могилянська, Немишлянська.

Підземні води. Вибір проб підземних вод в 2024-2025 роках проводився в колодязях, індивідуальних свердловинах та водозабірних колонках, розташованих по вулицях Заповідна, 54; Плідна, 28; Танкова, 129, по провулку 1-й Плідний, 9 та в джерелі з каптажем по вулиці Заповідна, 66. В залежності від розміщення домоволодінь в межах зазначених вулиць, інтенсивність забруднення підземних вод дещо змінюється.

На період досліджень, забруднення підземних вод нафтопродуктами зафіксовано в 2-х *водозабірних колонках* по провулку 1-й Плідний, 9 та на вулиці Плідна, 28 в концентраціях відповідно 1,68 мг/дм³ (16,8 ГДК) і 0,15 мг/дм³ (1,5 ГДК).

В *колодязі* по вулиці Заповідна, 54 та в джерельній воді по вулиці Заповідна, 66 вміст нафтопродуктів становив відповідно 0,43 мг/дм³ (4,3 ГДК) та 0,64 мг/дм³ (6,4 ГДК). В *свердловині* по вулиці Танкова, 129 в весняний період 2025 р. з'явилися нафтопродукти, концентрація яких становила 0,83 мг/дм³ (8,3 ГДК). За солевмістом вода прісна.

Екологічна ситуація, яка формується в водному середовищі підземної гідросфери на постраждалій території досить небезпечна і потребує подальшого контролю за зміною концентрації нафтопродуктів в питній воді та контролю щодо появи їх в джерелах водокористування - в колодязях, свердловинах та водозабірних колонках на територіях інших приватних домоволодінь.

Поверхневі води. В річці Немишля за солевмістом вода прісна (мінералізація становила 0,85 – 1,19 мг/дм³), що не перевищує нормативні вимоги [3]. *Нафтопродукти* в поверхневих водах р. Немишля в цілому за період досліджень зафіксовані в концентраціях від *менше* 0,05 мг/дм³ (відсутні) до 0,05 – 0,67 мг/дм³ (2,23 ГДК). При цьому, в літній і весняний періоди в річковій воді нафтопродукти відсутні; в осінньо-зимовий період - присутні в концентраціях від 0,05 мг/дм³ до 0,63 – 0,67 мг/дм³ (0,21 - 2,23 ГДК).

Донні відкладення. Водний розчин донних відкладів р. Немишля відноситься до прісних з мінімальним солевмістом. За період досліджень мінералізація змінювалася в межах 0,16 – 0,30 мг/кг. Донні відклади в зоні впливу вибуху та пожежі на нафтобазі, досить інтенсивно забруднені *нафтопродуктами*, вміст яких на контролбованій ділянці річки змінюється від 64 - 492 мг/кг до 3063 – 3564 мг/кг (від *менше* ГДК до 6,1-7,1 ГДК)) і важкими металами, зокрема, *цинком* (1,48 - 8,48 ГДК), *нікелем* (1,45 – 6,75 ГДК), *бором* (1,10 – 1,60 ГДК) і *барієм* (1,10 – 1,71 ГДК).

На час досліджень донні відкладення являють собою джерело забруднення

річкової води зазначеними компонентами і представляють загрозу як для гідробіоценозів р.Немишля, так і для екосистеми річки в цілому.

Ґрунти. Водний розчин ґрунтів відноситься до прісних з мінімальним солевмістом. За період досліджень мінералізація змінювалася в межах 0,16 – 0,30 мг/кг та в межах 0,16 – 0,37 мг/кг.

На території земельних ділянок приватних домоволодінь ґрунти досить інтенсивно забруднені *нафтопродуктами* та важкими металами, зокрема, *цинком*, *нікелем* та, в поодиноких пробах, - *свинцем* і *бором* (валова форма).

Концентрації *нафтопродуктів* в ґрунтах зони аерації змінювалася в залежності від глибини та планового розміщення точок відбору проб (табл. 1).

Таблиця 1 – Вміст нафтопродуктів у ґрунтах в залежності від глибини відбору в період літньо-осінньої межени 2024 року

Назви вулиць	Вміст нафтопродуктів на глибині 0,15 м, мг/кг	Вміст нафтопродуктів на глибині 0,5 м, мг/кг	Вміст нафтопродуктів на глибині 1,0 м, мг/кг
Вул. Заповідна, 22 *	15,0	69,0	90,0
Вул. Заповідна, 54*	35,0	-	-
Вул. Немишлянська, 256*	15,0	-	-
Вул. Могилянська, 64**	248,0	65,0	30,0
Вул. Танкова, 129**	3784,0 (7,7 ГДК)	3463,0 (6,9 ГДК)	-
Вул. Ясенева, 41/1**	20109,0 (40,2 ГДК)	2746, 0 (5,49 ГДК)	5533,0 (11,07 ГДК)
Пров. 1-й Плідний, 22/9**	65,0	35,0	35,0
Пров. 1-й Плідний, 16 **	64,0	104,0	1746,0 (3,49 ГДК)
Вул. Плідна, 28**	49,5	10,0	10,0
Вул. Велозаводська ***	1080,0 (2,16 ГДК)	-	-
Вул. Танкова, 129***	1809,0 (3,62 ГДК)	3951,0 (7,90 ГДК)	442,0
ГДК згідно [4]	500,0 мг/кг		0,06

*)Примітка – місяць відбору проб ґрунту: * - в липні 2024 р.; ** - в серпні 2024р.; *** - на початку вересня 2024 р.

В цілому за період досліджень 2024 – 2025 років в при поверхневому шарі (на глибині 0,0-0,05 м) концентрації становили 3912 - 12582 мг/кг (7,82 – 25,16 ГДК); На глибині 0,15 м за цей період вміст нафтопродуктів змінювався в межах 1073 - 6497 мг/кг (2,01 -12,99 ГДК). При цьому в період літньо-осінньої межени 2024 року на глибині 0,15 м, 0,5 м і 1,0 м концентрації *нафтопродуктів* в ґрунтах були дещо другими (таблиця1). Такий розподіл концентрацій нафтопродуктів по глибині зони аерації свідчить про поступову міграцію розчинених нафтопродуктів до рівня грантових вод і

з часом можливе їх надходження в ґрунтові води та потрапляння в річку Немишля.

Концентрації рухомої форми *біофільних металів* в ґрунтах перевищують ГДК і становлять: для *цинку* - 1,09 – 3,22 ГДК, для *свинцю* - 1,12 – 1,15 ГДК, для марганцю – 1,5 ГДК. Для цих металів значення коефіцієнтів біологічного поглинання відносно значні - ($A_x = 14 - 2$) /5/, що свідчить про їх хороше поглинання рослинами.

Радіаційний стан ґрунтів. В ґрунтах земельних ділянок та в донних відкладеннях р. Немишля забрудненість радіонуклідами відсутня: доза *гама-* та *бета-випромінювання* не перевищує нормативних вимог. За період досліджень доза *гама-випромінювання* змінювалася в межах 5,7 – 14,0 мкР/год – для ґрунтів; в межах 4,8 – 11,0 мкР/год – для донних відкладень. Доза *бета-випромінювання* - в межах 1,6 – 3,6 част/хв/см² – для ґрунтів та 1,8 – 3,2 част/хв/см². Це свідчать про їх радіаційну безпеку.

На час досліджень ґрунти на присадибних ділянках приватного сектору являють собою джерело забруднення рослинності нафтопродуктами та важкими металами, що унеможлиблює безпечне вирощування огородини для споживання. В цих умовах існує ризик захворювань дорослих і дітей.

Соціально-економічні наслідки вибуху нафтобази

Згідно з листом Голови адміністрації Немишлянського району Харкова, кількість мешканців, які проживали на території, прилеглої до нафтобази (ТОВ «ХНБ» - Резерв) в довоєнний час (станом на лютий 2024 року) становила 202 особи, у тому числі – 21 дитина. Кількість жителів, які постраждали в результаті вибуху - 60 осіб (у тому числі – 11 дітей). Серед постраждалих – 7 загиблих (у тому числі – 3 дитини).

Висновки про соціально-економічні наслідки вибуху нафтобази ґрунтуються на основі анкетного опитування респондентів - представників місцевого населення Немишлянського району Харкова за кількісним (чисельність, вікова група) та якісним (категорії населення – стать, вид та сфера діяльності) показниками.

Серед респондентів в анкетному опитуванні приймали участь 35,7 % жінок і 64,3 % чоловіків. Серед дорослих переважає населення у віці від 40-60 до понад 60 років. В переліку дітей 50 % займають діти віком 1-5 років; 25 % - діти віком 5-10 років; 12,5 % - діти віком 10-15 років і 12,5 % - діти віком від 15 до 20 років В групі людей похилого віку (більше 60 років) - 50%. Респонденти віком 40-60 років складають 37,5%; до 20 років – 12,5%. При цьому в сім'ях восьми респондентів підрастає 10 дітей віком від 1-5 років до 15-20 років, тобто, переважної тенденції до старіння населення не спостерігається. Проте, проаналізовані демографічні показники показують на те, що

під час війни на території склалися такі екологічні умови, які роблять зону впливу вибуху на нафтобазі дуже небезпечною для проживання.

Не є сприятливою демографічна ситуація в результаті переміщення жителів в інші області України або за кордон (у частини з них під час пожежі повністю згоріли будинки). За словами респондентів, відбулося значне зменшення чисельності жителів на території, яка потрапила в зону впливу вибуху та пожежі. *Однією з причин*, через яку це могло відбутися і відбувається, є війна, обстріли. *Другою* - катастрофічне забруднення нафтопродуктами довкілля як в цілому на території проживання, так і на присадибних земельних ділянках. *Третьою причиною* є проблема зайнятості населення.

За даними анкетного опитування, зайнятість населення складає 25%. Не працюють – 75%. Для 50 % респондентів основним джерелом доходів є доходи за рахунок пенсійного забезпечення. На державних підприємствах ніхто з опитаних не працює. В комерційній структурі задіяні лише 25 % респондентів.

Таке співвідношення не могло не відзначитися на наявних доходах населення під час війни, які в досліджуваній зоні в середньому на місяць складають 1000-5000 грн. на родину для 75,0 % респондентів (максимальний дохід при цьому досягає 5000-10000 гривень (12,5 %), мінімальний – 600 - 1000 гривень (12,5 %)). Середній індивідуальний прибуток на кожного з членів родини залежить від прибутку у родині і становить від мінімального - 200-400 гривень (12,5 %) до максимального - 1000-3500 гривень (12,5%). У середньому для 25 % він становить 250-1670 гривень на кожного члена родини в місяць.

Таким чином, серед мешканців зазначеної території, за доходом на душу населення є сім'ї, які збідніли за певних умов, спричинених агресією РФ. При цьому 87,5.% респондентів відзначали, що живуть без надмірностей і купують тільки найнеобхідніші продукти й предмети першої необхідності. Більшість респондентів (62,5 %) відзначили, що грошового забезпечення на оплату комунальних послуг і покупку господарських товарів першої необхідності недостатньо, оскільки на це йде більша частина доходу родини. Зі слів 50 % респондентів, недостатньо грошового забезпечення і на утримання дітей.

Визначено, що для 75 % респондентів умови їх існування та господарської діяльності до війни і на початку війни в значній мірі залежали від доходів за рахунок вирощування огородини на присадибних земельних ділянках, що стало неможливим після вибуху нафтобазі в результаті значного забруднення ґрунтів нафтопродуктами.

В умовах постійного бомбардування Харкова в цілому і неодноразового попадання території досліджень під обстріли ракет, шахедів і безпілотників, як в нічний час, так і вдень протягом понад 3-х років, на перший план виходить психологічний аспект в стані здоров'я і дітей, і дорослих в результаті перебування в ситуації постійного стресу і недосипання. При цьому склалася несприятлива ситуація щодо захворюваності дітей.

Динаміка цього показника за останні три роки війни є негативною. Після вибуху нафтобази та пожежі, 60 % респондентів спостерігали пригнічення дітей в результаті страху перед вибухами; 60 % - страху дітей перед обстрілами, які відбуваються вночі і вдень кожного дня; 60 % - пригнічення від звучання сирени під час тривоги.

Такий стан захворюваності дітей вказує на наявність певних проблем навіть на фоні складної соціально-економічної ситуації як в державі (в Україні) в цілому, так і в прифронтових умовах Харкова.

Загалом, результати досліджень дозволили визначити основні матеріальні і демографічні аспекти соціально-економічних та екологічних проблем (в тому числі, що стосується здоров'я дітей), які потребують першочергового комплексного вирішення. Вони висвітлюють наступну оцінку наслідків катастрофічної події, спричиненої агресією Російської Федерації.

Щодо загальної демографічної структури

Результати опитування респондентів по комплексу таких показників, як власна оцінка:

- *рівня матеріального благополуччя й тенденцій його зміни під час війни;*
- *рівня споживання товарів першої необхідності;*
- *спроможності оплати комунальних платежів;*
- *основним джерелам доходу населення й частки в них натурального господарства* - демонструють об'єктивний рівень матеріального благополуччя, яке, в цілому, оцінюється, як незадовільне на період проведення досліджень.

Щодо умов проживання та здоров'я дітей

Результати опитування респондентів по комплексу таких показників, як власна оцінка:

- *умов проживання дітей під час війни;*
- *стану здоров'я дітей до війни, та його зміни після початку війни і в період її продовження;*

- стану здоров'я дітей після вибуху нафтобази і пожежі та в умовах катастрофічного екологічного стану довкілля - демонструють об'єктивний стан здоров'я дітей, що значно погіршилося після вибуху на нафтобазі і оцінюється як вкрай незадовільне на період проведення досліджень, а також демонструють об'єктивний стан вкрай небезпечної екологічної ситуації довкілля, в якій знаходяться діти.

Щодо відношення респондентів до необхідності подальшого проведення досліджень поточного екологічного стану довкілля

Результати опитування респондентів по комплексу таких показників, як власна оцінка:

- небезпечних змін екологічного стану довкілля після вибуху нафтобази;
 - необхідності забезпечення умов проживання та збереження здоров'я дітей;
 - необхідності збереження соціально-економічних та екологічних умов життя місцевого населення;
 - необхідності відновлення господарської діяльності на присадибних ділянках
- демонструє об'єктивні потреби жителів у відновленні оптимально необхідного екологічного стану довкілля, який, в цілому, оцінюється, як незадовільний на період досліджень 2024-2025 рр.

З погляду надання наукової допомоги УКРНДІЕП в дослідженні поточного екологічного стану довкілля в зоні катастрофічного впливу вибуху на нафтобазі, 100% респондентів позитивно оцінюють факт продовження проведення досліджень з розробкою науково обґрунтованих рекомендацій щодо реабілітації найбільш забруднених та життєво важливих компонентів довкілля як на території їх приватного господарства, так і в цілому, в межах постраждалої території. Встановлено, що 100 % респондентів вбачають необхідність в продовженні дослідження поточного екологічного стану довкілля і дотримуються позиції, що відновлення умов їх проживання є комплексною проблемою вирішення якої буде гарантувати екологічну, економічну і соціальну безпеку. При цьому в проведенні досліджень віддають перевагу науковцям.

1. Основні аспекти соціально-економічних і екологічних проблем, та особливості їх вирішення

Результати соціально – економічних досліджень стали основою для визначення найбільш небезпечних аспектів проблеми, пов'язаної з наслідками вибуху нафтобази для здоров'я дітей, для екологічних умов їх проживання на території, що знаходиться в осередку забруднення довкілля, для матеріального добробуту жителів. Від надії на

поміч в вирішенні цієї проблеми, залежить фізичний і психологічний стан дітей і дорослих. Саме ці питання викликають тривогу і психологічну подавленість у більшості респондентів.

Основними питаннями, які потребують своєчасної уваги, та загальні рекомендації щодо їх вирішення є наступні:

1) Результати аналізу матеріального становища і потреб жителів території, що зазнала катастрофічної зміни екологічного стану довкілля від вибуху нафтобази, свідчать про їх досить скрутне матеріальне становище.

Деяким сім'ям необхідна грошова допомоги для утримання дітей.

2) В досліджуваному районі життєвий рівень населення в умовах війни дуже низький. Після вибуху та пожежі на нафтобазі відбулось значне забруднення ґрунту нафтопродуктами і вирощувати сільгосппродукти, що забезпечувало додатковий дохід в сімейний бюджет (зокрема, овочеві культури), стало неможливим.

В таких умовах існує необхідність в реалізації додаткових заходів щодо очищення ґрунтового покриву від нафтопродуктів для відновлення господарської діяльності на присадибних ділянках.

3) Реалізація заходів щодо зниження впливу на довкілля в період критичного екологічного стану, зокрема, зняття шару найбільш забруднених ґрунтів і заміна його шаром чистих грантів на деяких присадибних земельних ділянках та вилучення нафтопродуктів в руслі р. Немишля, не вирішила до кінця посталої проблеми. На час досліджень залишається забруднення ґрунтів, яке в залежності від глибини відрізняється інтенсивністю.

Екологічна ситуація при цьому потребує розробки рекомендацій щодо методів очищення ґрунтів на різній глибині їх забруднення.

4) В умовах війни при постійних ракетних обстрілах Харкова і після вибуху нафтобази та катастрофічного забруднення довкілля, діти на протязі трьох років перебувають в стані хронічного стресу та соматичних захворювань.

В цій ситуації є необхідність в забезпеченні умов обстеження і аналізу фізичного та психологічного стану дітей і при потребі – організації психологічної допомоги.

5) Враховуючи значне забруднення нафтопродуктами ґрунтів і водного середовища, місцеві жителі що проживають в осередку забруднення, дуже стурбовані стосовно забезпечення прийнятних умов для подальшого проживання дітей і збереження їх здоров'я.

В цій ситуації є потреба в об'єктивній інформації щодо стану забруднення ґрунтів на присадибних ділянках та в офіційних висновках щодо можливості вирощування с/г продукції на присадибних ділянках, а також щодо якості питної води в колодязях і індивідуальних свердловинах.

б) З погляду надання наукової допомоги в дослідженні поточного екологічного стану довкілля в осередку забруднення, жителі постраждалої території рахують за необхідне і мають надію на подальше проведення моніторингових досліджень поточного стану підземних і поверхневих вод та забруднення ґрунтів в межах їх приватних господарств і в цілому в районі.

Необхідне подальше проведення моніторингу поточного екологічного стану підземних вод питного призначення та ґрунтів на земельних ділянках, забруднених нафтопродуктами.

Приведені в переліку проблеми, що потребують вирішення, демонструють об'єктивні потреби жителів в відновленні оптимально необхідного екологічного стану і економічного благополуччя, які, в цілому, оцінюються, як незадовільні на період проведення досліджень.

2 Рекомендації щодо реабілітації та очищення ґрунтового покриву на присадибних ділянках і очищення питної води від нафтопродуктів

Очищення ґрунтів від нафтопродуктів досить складний процес, який потребує використання сучасних технологій і методів. Серед них основними є: механічне очищення; фізико-хімічне очищення і біологічне очищення ґрунтів та води.

Аналіз існуючих методів дозволив вибрати найбільш прийнятний в використанні для умов воєнного стану – метод біологічного очищення (технологія біоре mediaції). Цей метод включає технологію фітостимуляції, яка використовується для біодеградації мікробами гідрофобних речовин в ризосфері (зокрема, нафтопродуктів).

2.1 Рекомендації щодо очищення ґрунтів

Нафтопродукти не можуть поглинатися рослинами, але вони можуть бути деградовані мікробами (процес фітодеградації). При фітодеградації ферменти рослин руйнують органічні гідрофобні речовини (нафтопродукти).

Для очищення ґрунтів на присадибних земельних ділянках приватного сектору, де зафіксовані нафтопродукти в концентраціях вище ГДК в поверхневому шарі ґрунту, рекомендується висаджувати дерева та засівати травами. При цьому повинні використовуватися рослини з обширною і щільною кореневою системою. Оскільки

корені трав ростуть до глибини 0,5 м, а дерев – до глибини 3,0 м, для очищення ґрунтів на глибині 0,15 – 0,50 м рекомендується використовувати траву *овсяниця – Fstucaspiплевел – Loliumsp.* Для очищення ґрунтів на глибині 1,0 м і більше - *тутове дерево (шовковиця)*.

Зазначений метод фіторемедіації має високу ефективність, дешевий в реалізації, але має один недолік - довготривалі перспективи очищення.

2.2 Рекомендації щодо очищення питної води

Для очищення від нафтопродуктів питної води з колонок, свердловин і колодязів, слід перед використанням пропустити її через фільтри з активованим вугіллям.

Метод очищення води активованим вугіллям має високу ефективність, значну потужність і дешевий в реалізації.

3. Рекомендації щодо подальшого проведення моніторингових досліджень підземних вод питного призначення та ґрунтів

Періодичність повторного відбору проб води та ґрунту після аварії та після проведення моніторингових досліджень впродовж гідрологічного року наступна.

Для підземних вод:(якщо є ризики подальшого забруднення)

Для контролю динаміки в часі установленого забруднення **питної води** в ряді водозабірних колонок, свердловин і колодязів, а також для контролю появи нафтопродуктів в других джерелах водокористування, рекомендується:

- продовжити проведення моніторингу з повторністю 1 раз на півроку (при стабільному покращенні), а якщо буде виявлено відхилення – кожні 3-и місяці.

Нормативи: ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ ISO 5667-6:2001, рекомендації МОЗ щодо питної води.

Для поверхневих вод р. Немишля рекомендується відбір проб проводити 2-а рази на рік з періодичністю 1 раз на півроку (після весняного повіддя та в період осінньо-зимової межені). В разі збільшення інтенсивності забруднення річкової води нафтопродуктами – 1 раз в квартал (4 рази на рік).

Нормативи: Санітарні правила 4630-88, накази Міндовкілля.

Для ґрунтів: Ґрунти на території житлової забудови, дитячих майданчиків та зони дозвілля рекомендується контролювати кожні 6 місяців. Авторами рекомендується: в періоди після весняного повіддя та після осінньої межені.

Нормативи: ДСТУ 4287:2004, санітарні правила забудови, Закон «Про охорону земель».

Висновки

Висвітлення та вирішення проблем постраждалої громади в Немишлянському районі Харкова є актуальним, оскільки значна частина жителів на даний момент проживають на забруднених територіях, а частина планують повернення після війни лише при відновленні екологічного стану довкілля до прийнятних для проживання умов.

Рішення щодо поточного та повоєнного відновлення екологічного стану повинно ґрунтуватися на колегіальному баченні науковців, органів влади (адміністрації Харкова), органів місцевого самоврядування та міжнародних організацій.

Підтримка Дитячого фонду ООН (ЮНІСЕФ) забезпечила виконання наукових досліджень (інженерно-екологічних вишукувань, проведення соціологічних досліджень, організації і проведення моніторингу, хіміко-аналітичних досліджень ґрунтів) та об'єктивної оцінки екологічного стану довкілля на такому рівні, який дозволив обґрунтувати заходи, пов'язані із зниженням техногенного навантаження на ґрунти і водне середовище.

Цим зроблено значний першочерговий вклад в відновлення території та повернена надія постраждалих жителів на поміч (при обов'язковому залученні органів влади), в вирішенні екологічної і соціальної проблем від чого в подальшому залежить фізичне і психологічне здоров'я дітей.

Література

1. Гриценко А.В., Маркіна Н.К. Методологія дослідження екологічних та соціально-економічних наслідків вибуху та пожежі на нафтобазі під час бомбардування в м. Харкові // Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки: зб. наук. пр. / УКРНДІЕП – Х.: ПП «Стиль-Іздат», 2024. — Вип.46. – С. 5-19.
2. Гриценко А.В., Маркіна Н.К. Організація оперативного моніторингу довкілля як екологічна основа забезпечення цивільного захисту в умовах катастрофічних ситуацій // *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнар. наук.-практич. конф. м. Харків, НУЦЗУ, 16 травн. 2024 р. Харків, 2024. С. 294-295. URL: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/PES-2024.pdf>
3. Загальний перелік гранично допустимих концентрацій (ГДК) і орієнтовно безпечних рівнів впливу (ОБРВ) шкідливих речовин для води рибогосподарських водойм

(таблиця 1): [№ 12-04-11 чинний від 09-08-1990]. Термін дії подовжено до 1 січня 2025 року Наказом ДСНС України № 473 від 31.08.2017 р.

4. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин : Постанова КМУ № 1325 від 15 грудня 2021 р. [Чинний від 2021-12-15].

5. Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів. Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ No 1247 від 01.11.2024.
[URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-%D0%BF#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-%D0%BF#Text).

Авдієнко І. А., аспірант;

Юрченко В. О., д-р техн. наук, проф.

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
м. Харків, Україна*

ПРОБЛЕМА ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ НА МІСЬКИХ СПОРУДАХ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД

Муніципальні очисні споруди (ОС) є критично важливими елементами системи водопостачання та водовідведення, оскільки забезпечують зменшення антропогенного навантаження на водні об'єкти та підтримання санітарно-епідеміологічної безпеки. Разом із тим їх експлуатація супроводжується емісіями парникових газів (ПГ), серед яких домінують вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4) та закис азоту (N_2O), що суттєво впливають на кліматичні процеси [1–3]. Особливе занепокоєння викликає ситуація на вітчизняних ОС, де переважно застосовуються застарілі технологічні рішення, не здатні забезпечити ефективне видалення азотних сполук. Це зумовлює інтенсивне утворення N_2O — парникового газу з надзвичайно високим потенціалом глобального потепління (GWP), який більш ніж у 265 разів перевищує відповідний показник для CO_2 .

Методологія IPCC (2019) класифікує CO_2 , що утворюється у процесах біологічного очищення стічних вод, як біогенний, у зв'язку з чим його не враховують у національних інвентаризаціях [4]. Водночас наукові дослідження останніх років доводять, що істотна частка цих емісій може бути пов'язана з окисненням синтетичних органічних сполук і, відповідно, мати викопну природу [5–7]. Нехтування даним чинником може зумовити недооцінку реального внеску очисних споруд у зміну клімату.

Крім того, недостатня ефективність процесів очищення стічних вод призводить до підвищеного вмісту забруднювальних речовин у скидах, що, у свою чергу, може спричиняти вторинні емісії парникових газів у природних водоймах [8]. У зв'язку з цим комплексний аналіз утворення та динаміки викидів CO_2 і N_2O під час біологічної очистки стічних вод та після їхнього скиду є необхідним для підвищення екологічної ефективності муніципальних очисних споруд і забезпечення адекватного відображення їхнього внеску у глобальний вуглецевий баланс.

Мета дослідження — кількісна оцінка питомих викидів вуглекислого газу (CO_2) та закису азоту (N_2O), що утворюються під час біологічної очистки стічних вод та після їх скиду у природні водойми.

Викиди метану (CH_4) у рамках цього дослідження не оцінювались через обмеженість наявних вихідних даних.

Об'єкт дослідження — міські очисні споруди міста Харків (МОСВ №2, 225 000 м³/добу) та очисні споруди одного з населених пунктів у Німеччині (15 890 м³/добу).

Для кількісної оцінки питомих викидів парникових газів на досліджуваному об'єкті проведено розрахунок потенційних викидів закису азоту (N₂O) та вуглекислого газу (CO₂) під час очищення та скиду стічних вод. Обчислення здійснювалися відповідно до методичних рекомендацій Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC, 2019) [4], із використанням коефіцієнтів викидів та уточнених даних із досліджень Ванга Д. та співавторів [8]. Викиди N₂O були переведені у CO₂-еквіваленти з урахуванням потенціалу глобального потепління, який для N₂O становить 265, а для CO₂ — 1.

Розрахунок парникових газів, що утворюються на очисних спорудах, виконували за наступними рівняннями:

$$N_2O_{bio,i} = EF_{bio,N_2O,j} * TN_{in,i} * 265 \quad (1)$$

$$CO_{2bio,i} = EF_{bio,CO_2,j} * COD_{removed,i} \quad (2)$$

де N₂O_{bio,i} та CO₂_{bio,i} — це викиди N₂O та CO₂ (г CO₂ екв/рік) від біологічного очищення на ОС; EF_{bio, N₂O,j} (г N₂O/кг TN) та EF_{bio, CO₂,j} (г CO₂/кг вилученого ХСК) — відповідні коефіцієнти викидів для процесу АО. TN_{in,i} — річна маса загального азоту у вхідному потоці (кг/рік), COD_{removed,i} — річна кількість вилученого ХСК (кг/рік) 265 — коефіцієнт перерахунку N₂O в CO₂-еквівалент.

Викиди парникових газів під час скиду очищених стічних вод у природні водойми оцінювалися з використанням відповідних розрахункових формул:

$$N_2O_{eff,i} = EF_{eff,N_2O,j} * TN_{out,i} * 265 \quad (3)$$

$$CO_{2eff,i} = EF_{eff,CO_2,j} * COD_{out,i} \quad (4)$$

де N₂O_{eff,i} та CO₂_{eff,i} — це викиди N₂O та CO₂ (г CO₂ екв/рік) від шляху скиду; EF_{eff, N₂O,j} (г N₂O/кг TN на виході) та EF_{eff, CO₂,j} (г CO₂/кг COD на виході) — це коефіцієнти викидів для шляху скиду; COD_{out,i} (кгCOD вихід/рік) та TN_{out,i} (кг TN вихід/рік) — це маси ХСК та N_{заг.} на виході за рік.

Для очисних споруд міста Харків (МОСВ №2) концентрації забруднюючих речовин у вхідних стічних водах становили: ХСК — 420 мг/л та N_{заг} — 50 мг/л, тоді як у очищених стоках залишкові концентрації знизилися до ХСК — 60 мг/л та N_{заг} — 33,5 мг/л (табл. 1). Це відповідає ефективності видалення органічних речовин на рівні 85,7%, тоді як видалення загального азоту становило лише 33%. Дані свідчать про те, що МОСВ №2 забезпечують високий рівень очищення стічних вод від органічних забруднень, проте видалення азоту залишається недостатнім, що вказує на потребу вдосконалення технологій. Слід також враховувати, що водний об'єкт, який приймає очищені стоки — річка Уди глибоко евтрофікована.

Таблиця 1 – Порівняння питомих викидів парникових газів з МОСВ №2 м. Харків та на досліджуваному об'єкті у Німеччині.

Характеристика стічних вод		Питомий викид парникових газів, тCO ₂ екв/м ³ СВ			
Концентрація Nзаг $\frac{\text{вхід}}{\text{вихід}}$, мг/л	Концентрація ХСК $\frac{\text{вхід}}{\text{вихід}}$, мг/л	Під час очистки стічних вод		Після скиду СВ у водний об'єкт	
		N ₂ O	CO ₂	N ₂ O	CO ₂
Очисні споруди м. Харків, Україна (225 000 м³/добу)					
$\frac{50}{33,5}$	$\frac{420}{60}$	0.00033	0.0002	0.00007	0.00003
Очисні споруди в Німеччині (15 890 м³/добу)					
$\frac{30,5}{9,29}$	$\frac{363,13}{18,13}$	0,0002	0,0001	0,000019	0,00001

На досліджуваних очисних спорудах Німеччини концентрації забруднень у вхідних стічних водах складали: ХСК – 363,13 мг/л та Nзаг – 30,5 мг/л, тоді як після очистки залишкові концентрації становили: ХСК – 18,13 мг/л та Nзаг – 9,29 мг/л. Відповідно, ефективність видалення органічних забруднень досягала 95%, а загального азоту – 69,5%, що свідчить про значно вищий рівень технологічної ефективності очисних споруд. Проте, неповне видалення загального азоту (за рахунок високих концентрацій нітратів) вказує на недостатню активність процесів денітрифікації.

Аналіз даних таблиці свідчить, що питомі викиди парникових газів під час очистки стічних вод на МОСВ №2 перевищують відповідні показники досліджуваного об'єкта в Німеччині приблизно у 2–2,5 рази. Після скиду очищених стоків у водний об'єкт різниця у викидах залишається суттєвою: питомі викиди N₂O у Харкові перевищують німецькі приблизно у 3,7 рази, а CO₂ – у 3 рази, що підтверджує нижчу ефективність технологічних процесів та більший негативний екологічний вплив.

Висновки

1. Розрахунок викидів парникових газів показав, що основним джерелом кліматичного навантаження на обох об'єктах є N₂O. Питомі викиди N₂O у CO₂-еквіваленті під час біологічної очистки стічних вод у Харкові перевищують викиди CO₂ приблизно у 1,65 рази, а після скидання очищених стоків — майже у 2,3 рази. Така ситуація зумовлена недостатньою ефективністю видалення азоту при очистці міських стічних вод, що підкреслює необхідність забезпечення процесів денітрифікації.

2. Викиди CO_2 , пов'язані з розкладом залишкових органічних речовин у водних об'єктах після скидання стоків, були відносно невеликими, що свідчить про високу ефективність процесу видалення органічних забруднень на обох досліджуваних ОС.

3. Порівняльний аналіз питомих викидів показав, що на етапі очищення загальні викиди парникових газів на об'єкті в Німеччині приблизно у 2–2,5 рази нижчі, ніж на МОСВ №2 у Харкові. Після скиду стічних вод різниця у викидах N_2O становить майже у 3,7 рази, а CO_2 — у 3 рази, що відображає нижчу технологічну ефективність МОСВ №2 Харків та більший негативний екологічний вплив.

4. Отримані результати підкреслюють необхідність модернізації технологічних процесів на вітчизняних очисних спорудах, особливо щодо підвищення ефективності видалення азоту, що дозволить значно зменшити парникові викиди та знизити негативний кліматичний вплив цих систем водовідведення.

Література

1. Bani Shahabadi, M., Yerushalmi, L., & Haghighat, F. (2009). Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. *Water Research*, 43(10), 2679–2687.
2. Larsen, T. A. (2015). CO_2 -neutral wastewater treatment plants or robust, climate-friendly wastewater management? A systems perspective. *Water Research*, 87, 513–521.
3. Sweetapple, C., Fu, G., & Butler, D. (2014). Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment. *Water Research*, 62, 249–259.
4. IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
5. Schneider, A. G., Townsend-Small, A., & Rosso, D. (2015). Impact of direct greenhouse gas emissions on the carbon footprint of water reclamation processes employing nitrification–denitrification. *Science of The Total Environment*, 505, 1166–1173.
6. Tseng, L. Y., et al. (2016). Identification of Preferential Paths of Fossil Carbon within Water Resource Recovery Facilities via Radiocarbon Analysis. *Environmental Science & Technology*, 50, 12166–12178.
7. Bao, Z., Sun, S., & Sun, D. (2015). Characteristics of direct CO_2 emissions in four full-scale wastewater treatment plants. *Desalination and Water Treatment*, 54, 1070–1079.
8. Wang, D., Ye, W., Wu, G., Li, R., Guan, Y., Zhang, W., Wang, J., Shan, Y., & Hubacek, K. (2022). Greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment facilities in

China from 2006 to 2019. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01194-5>

***ПОДЯКА**

Дослідження було проведено в рамках виконання проєкту «StormCompetence – Strengthening researchers’ professional competencies on stormwater management for renovation of UA city infrastructure in the post-war time». Проєкт профінансовано програмою Swedish Institute.

Адамова Г. В.;

Пісня Л. А., канд. техн. наук

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ЕКОЛОГІЧНА ІНТЕГРАЦІЯ УКРАЇНИ У ТРАНСПОРТНЕ ПЛАНУВАННЯ КРАЇН ЄС

Сучасні виклики, зумовлені збройною агресією, руйнуванням інфраструктури, зміною ландшафтних структур та зростаючим антропогенним навантаженням, вимагають не просто технічного відновлення дорожньої мережі нашої країни, а створення якісно нової моделі її проєктування, будівництва та експлуатації, орієнтованої на забезпечення екологічної стійкості.

Ключовим інструментом планування та розвитку цілісної, ефективної, мультимодальної та високоякісної транспортної інфраструктури на всій території ЄС є проєкт TEN-T (транс'європейська транспортна мережа), який спрямований на розвиток та інтеграцію транспортних мереж, в тому числі і автомобільних доріг, між країнами-членами ЄС та сусідніми країнами у зв'язку з необхідністю створення більш потужного єдиного європейського ринку, нові правила дозволять використовувати більш екологічні види транспорту, сприятимуть цифровізації та покращать використання для пасажирів кількох видів транспорту під час однієї поїздки [1].

Інтеграція України до основної та розширеної мережі TEN-T дозволить розкрити логістичний потенціал України як ключового транзитного коридору ЄС. Так, в червні 2025 року у Брюсселі відбулись двосторонні зустрічі делегацій України та Європейської Комісії в межах офіційного скринінгу відповідності українського законодавства до права ЄС. Зустріч охоплювала ключові сектори транспортної сфери зокрема: автомобільний транспорт, безпеку, цифровізацію, управління інфраструктурою та інтеграцію України до TEN-T [2].

Під час планування нових маршрутів та реконструкції існуючих шляхів надзвичайно важливо враховувати екологічні аспекти, які визначають стійкість транспортної інфраструктури до антропогенних впливів та забезпечують мінімізацію шкоди довкіллю. Указом № 642/2024 від 20.09.2024 [3] президент України затвердив зміни до Угоди [4] між Україною та Європейським Союзом про вантажні перевезення

автомобільним транспортом Угоду було підписано 29.06.2022. Завдяки її дії суттєво збільшено обсяги торгівлі на користь економік обох сторін після повномасштабного російського вторгнення. Змінена угода охоплює нові положення, в тому числі вимогу до транспортних операторів мати при собі документи, що підтверджують дозвіл на здійснення міжнародних перевезень. Вона також містить положення щодо посилення контролю за дотриманням автомобільними перевізниками зобов'язань за угодою.

Багато регіонів України, вирізняються високим рівнем природної цінності, наявністю екологічних коридорів, міграційних шляхів тварин, рідкісних видів рослин. Без належного урахування цих чинників відновлення автомобільної мережі може призвести до ще більшої фрагментації природного середовища, блокування шляхів сезонних переміщень диких тварин, деградації ландшафтів. Усе це вимагає переходу до інтегрованого просторового планування, де екологічні межі враховуються на рівні з адміністративними та технічними. На сьогодні необхідне створення принципово нової моделі дорожнього будівництва, яка поєднує екосистемний підхід із цифровими технологіями моніторингу. Саме такий підхід дозволить сформувати цілісну та керовану систему «автомобіль – дорога – середовище» (АДС), у межах якої екологічна безпека розглядатиметься як невід'ємна частина транспортної та соціальної функції дороги.

Сучасні тенденції розвитку транспортної інфраструктури в країнах Європи [5, 6] свідчать про посилення екологічних вимог та інтеграцію екосистемного підходу у транспортне планування. Основною метою таких підходів є збереження біорізноманіття, мінімізація фрагментації природних ландшафтів і зменшення негативного впливу на довкілля при проектуванні та експлуатації дорожньої мережі.

На рівні ЄС ця інтеграція реалізується через розвиток концепції «зеленої інфраструктури» (Green Infrastructure) [7, 8], впровадження природоорієнтованих рішень (Nature-Based Solutions) [9] в транспортні проекти. Прикладом системного підходу є проект BISON (Horizon 2020) [5, 6], де розроблено Стратегічну програму досліджень, інновацій та впровадження (SRIDA) та Європейську карту дефрагментації (European Defragmentation Map), що визначають ключові напрями врахування екологічних факторів у всіх стадіях життєвого циклу транспортних об'єктів.

У Польщі було видано посібник [10] у якому систематизовано рекомендації щодо мінімізації фрагментації середовища проживання тварин під час будівництва автомагістралей, включаючи такі елементи, як просторове планування з урахуванням міграційних шляхів, будівництво екодуків, тунелів для амфібій, зелених мостів та

шумових бар'єрів зі структурованими поверхнями. Окрема увага приділяється аналізу смертності фауни на дорогах, впровадженню моніторингу та врахуванню кумулятивного впливу. Ці рекомендації становлять основу екосистемного підходу в дорожньому плануванні.

Практичні приклади інтеграції екологічних принципів у транспортне планування широко представлені в країнах Європи. Так, у Нідерландах уже кілька десятиліть розвивається мережа екодуків, що з'єднують розділені транспортною інфраструктурою природні території та забезпечують безпечну міграцію дикої фауни. Серед найвідоміших об'єктів – Natuurbrug Zanderij Crailoo [11], довжина якого перевищує 800 м, спроектований з урахуванням ширини та озеленення, придатного для використання різними видами тварин.

У Великій Британії під час розроблення інфраструктури району Ebbsfleet Valley (Garden City, графство Кент) екологічні аспекти враховувалися на етапах планування та реалізації транспортних зв'язків: передбачено високий рівень пішохідної та велосипедної доступності до вузлів громадського транспорту, рекультивацію та повторне використання індустріальних територій, розвиток зелених зон і водних елементів, що формують частину локальної «зеленої сітки» території [12].

У Данії, в межах проекту TIDE (Transport Innovation Deployment for Europe), впроваджено велосипедні маршрути з фізичним розмежуванням потоків, інтелектуальні рішення для пріоритету екологічного транспорту [13].

Інституційні механізми реалізації екосистемного підходу передбачають оновлення національних стратегій, вдосконалення процедур закупівель, створення центрів знань і навчання фахівців. Прикладом цього є Італія, де в 2021–2023 рр. за допомогою Інструменту технічної підтримки (TSI) Європейської Комісії було здійснено проєкт з інтеграції підходів «зеленої інфраструктури» до планування транспортних об'єктів [14]: проведено аналітичне дослідження кращих практик, розроблено рекомендації для впровадження в національному контексті, ініційовано перегляд правил публічних закупівель з урахуванням природоорієнтованих рішень.

Ще одним прикладом успішної реалізації екологічних стратегій є проєкт GREENMO (Green Mobility in Metropolitan Areas), впроваджений у місті Ліль (Франція). Проєкт зосереджено на розвитку екологічно чистих видів транспорту, таких як електробуси, велосипедні коридори, а також оптимізації міських логістичних схем, що дозволяє суттєво скоротити викиди парникових газів та покращити якість міського середовища. В межах проєкту активно застосовується GIS-моделювання екологічних

коридорів та зон екологічної чутливості і одним із результатів стало створення інтегрованої системи управління мобільністю з урахуванням даних цифрового моніторингу та участі громадськості у процесі прийняття рішень [15].

Для України важливо не лише врахувати ці приклади, а й адаптувати їх до власних реалій, зокрема через запровадження дієвих механізмів екологічного моніторингу. Цифрові технології – супутникові знімки, геоінформаційні системи, безпілотники, автоматичні станції вимірювання – відкривають нові можливості контролю за станом довкілля на різних етапах життєвого циклу дороги. Вони дозволяють виявляти зони надмірного забруднення, прогнозувати негативні зміни, оперативно реагувати на критичні екологічні ситуації. Особливу цінність має створення інтерактивних карт, які відображають розташування екологічно вразливих територій, видів-показників, шляхів міграції, що в сукупності дає змогу не лише ухвалювати зважені рішення, а й контролювати їх реалізацію.

Одним з ключових завдань національної безпеки України є інтеграція питань кібербезпеки та екологічної безпеки в системі «АДС». Де «АДС» є складним комплексом, в якому, з точки зору кібербезпеки, взаємодіють між собою технічні (автомобілі, дорожня інфраструктура, інженерні споруди), інформаційні (системи збору, передачі та аналізу даних) та екологічні (довкілля, моніторингові системи, екологічні дані) елементи. Необхідно пам'ятати, що ті кіберзагрози, що націлені на критичну інфраструктуру в системах «АДС», можуть мати шкідливий вплив та кризові наслідки для складових екосистем. Опубліковані в [16] результати дослідження типових кіберзагроз і вразливостей систем «АДС» до кібератак, де їх згруповано за спрямованістю на кожний з елементів «АДС» та запропоновано доцільні для підвищення рівня захисту заходи безпеки.

Окрім цього, додатковим важливим напрямом екологічної інтеграції є вдосконалення традиційних процедур контролю [16], зокрема оцінки впливу на довкілля (ОВД). Насамперед ідеться про перехід від традиційної комплексної оцінки до системного інтегрального підходу, що ґрунтується на багатокритеріальному аналізі всіх елементів «АДС» у вигляді багаторівневої ієрархії, що включає: мету; комплексні критерії та фактори впливу; умови формування та розповсюдження впливів від експлуатації автомобільної дороги у кожній складовій довкілля; параметри, що характеризують умови впливів у кожній складовій довкілля; комплексні заходи щодо зменшення впливу системи «АДС» на складові довкілля. Крім того, додатково

необхідно передбачити обов'язковий післяпроектний моніторинг, який дозволяє виявити розбіжності між прогнозованим і фактичним впливом на довкілля.

Європейський досвід [18] свідчить про ефективність екосистемного підходу у відбудові, де передбачається не лише формальне врахування природоохоронних вимог, але й міжгалузеву інтеграцію даних, цифрових систем моніторингу, залучення експертних груп, громадськості та науковців у процес ухвалення рішень. В повній мірі це стосується й розвиток у дорожньої мережі ЄС.

Новаторський регламент про відновлення природи [19] встановлює юридично обов'язкові цілі щодо відновлення 20% деградованих наземних і морських екосистем ЄС до 2030 року і всіх екосистем до 2050 року. Для досягнення цих цілей країни ЄС повинні відновити щонайменше 30% біотопів, охоплених законодавством, з поганого до доброго стану до 2030 року – таких як ліси, луки, водно-болотні угіддя, річки та озера – і 90% до 2050 року. Держави-члени також повинні забезпечити, щоб ці території не погіршилися після відновлення.

У березні з 2023 року, в Україні запустили перший Хаб природоорієнтованих рішень (Ukrainian NbS Hub) [20]. Пріоритет українського національного хабу з природоорієнтованих рішень (Nature-Based Solutions, NbS) полягає у спрямуванні зусиль на забезпечення післявоєнного відновлення та сталого розвитку, що включає природоорієнтовані рішення для громад, лісового господарства, водного сектору та сільського господарства у дружній до природи та стійкий до змін клімату спосіб, у той самий час надаючи людям робочі місця та нові економічні можливості.

Таким чином, інтеграція екологічних аспектів у транспортне планування в країнах Європейського Союзу відбувається шляхом поступового впровадження екосистемного підходу, заснованого на врахуванні екологічних обмежень, біорізноманіття, кліматичних ризиків і просторової взаємодії між транспортною інфраструктурою та природними системами.

Усі ці практики не лише сприяють збереженню природи, а й підвищують безпеку руху, запобігають аваріям за участю тварин, покращують імідж дорожньої галузі як соціально відповідального сектора і демонструють, що екологічна інтеграція – це не обмеження для інфраструктурного розвитку, а, навпаки, шлях до його безпеки та стійкості.

Для України адаптація європейських підходів може включати [21] : проектування дорожніх об'єктів із врахуванням екологічних коридорів та міграційних шляхів фауни; впровадження природоорієнтованих рішень для регулювання стоку, шуму, пилу та

біорізноманіття; цифровий моніторинг екологічного стану об'єктів транспортної інфраструктури; узгодження із системами стратегічної екологічної оцінки(CEO) та ОВД; залучення фінансування зокрема з програм LIFE, Horizon Europe, Recovery and Resilience Facility та інших інструментів зеленої трансформації.

Повоєнне відновлення дорожньої мережі України, у т.ч, має стати не лише викликом, а й можливістю для глибокої трансформації підходів до інфраструктурного розвитку.

Системний інтегральний підхід, що ґрунтується на багатокритеріальному аналізі всіх елементів «АДС» у вигляді багаторівневої ієрархії, що створюється на екологічно орієнтованих та екосистемних принципах у поєднанні з новітніми цифровими технологіями моніторингу дозволяє не просто зменшити негативний вплив доріг на довкілля, а й перетворити дорожню мережу на частину єдиної зеленої інфраструктури країни, що сприяє збереженню природи, адаптації до змін клімату та формуванню безпечного середовища для людини.

Доречно та важливо відмітити, що для успішної реалізації екологічної інтеграції у дорожню політику України необхідне створення міждисциплінарних команд, до яких спільно входять, як екологи, проєктанти, IT-фахівці, GiS-спеціалісти, експерти з біорізноманіття, так і представники громадськості та екологічні активісти територіальних громад. Такі команди повинні супроводжувати інфраструктурні проєкти від стадії планування до етапу експлуатації, забезпечуючи прозорість рішень і відповідальність за екологічні наслідки.

Література

1. Набувають чинності нові правила щодо транс'європейської транспортної мережі TEN-T. Центр транспортних стратегій.
URL: https://cfts.org.ua/news/2024/07/16/nabuvayut_chinnosti_novi_pravila_schodo_trans_evropeysko_transportno_merezhi_tent_79790
2. Україна розпочала скринінг з ЄС щодо транспортної політики та транс'європейських мереж. URL: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/news/ukrayina-rozpochala-skryning-z-yes-shhodo-transportnoyi-polityky-ta-trans-yevropejskyh-merezh/>
3. Про затвердження Угоди між Україною та Європейським Союзом про внесення змін до Угоди між Україною та Європейським Союзом про вантажні перевезення автомобільним транспортом: Указ Президента України від 20.09.2024 № 642/2024 //

- База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/642/2024> (дата звернення: 12.09.2025)
4. Угода між Україною та Європейським Союзом про внесення змін до Угоди між Україною та Європейським Союзом про вантажні перевезення автомобільним транспортом: Угода; Україна від 20.06.2024 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/984_012-24 (дата звернення: 12.09.2025)
5. BISON – Biodiversity and Infrastructure Synergies and Opportunities for European Transport Networks URL: <https://bison-transport.eu/>
6. Biodiversity at the centre of transport infrastructure planning// CORDIS. 2022.URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/451034-biodiversity-at-centre-of-transport-infrastructure-planning>
7. Green infrastructure // European Commission: Directorate-General for Environment. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/green-infrastructure_en
8. Green infrastructure // Biodiversity Information System for Europe (BISE). URL: <https://biodiversity.europa.eu/green-infrastructure>
9. Соловій, І., & Жмурко, Н. (2023). НАУКОВІ ЗАСАДИ ТА ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ВПРОВАДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ПРИРОДООРІЄНТОВАНИХ РІШЕНЬ. Економіка та суспільство, (55). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-85>
10. Охорона диких тварин при дорожніх інвестиціях. Київ, 2021. 100с. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/Posibnyk_z_Ochorony_dykykh_tvaryn-web1.pdf
11. Zanderij Crailoo met natuurontwikkeling. URL: <https://leidraadlc.noord-holland.nl/initiatief-inspiratie-project/zanderij-crailoo-met-natuurontwikkeling-gemeente-hilversum/>
12. Ebbsfleet Garden City. URL: <https://ebbsfleetgardencity.org.uk/>
13. Transport Innovation Deployment for Europe. // CORDIS. 2024. URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/158641-transportation-innovation>
14. OECD (2023), Developing an Integrated Approach to Green Infrastructure in Italy, OECD Public Governance Reviews, OECD Publishing, Paris, p. 139. URL: <https://doi.org/10.1787/d84bb8e4-en>
15. Greener transport infrastructure in Lille thanks to EUR 276 million from EIB and European Commission. URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/whats-

new/newsroom/25-09-2024-greener-transport-infrastructure-in-lille-thanks-to-eur-276-million-from-eib-and-european-commission_en

16. Адамова Г.В. Комплексний підхід до забезпечення екологічної безпеки в системі «АДС» в умовах цифровізації. / Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О.І. – К. :Видавничий дім «Гельветика», 2024. – №5 (56). С. 176-181. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.26> <http://ecoj.dea.kiev.ua/5-56-2024>

17. Адамова Г.В. Комплексне еколого-аналітичне оцінювання впливу системи «АДС» на складники довкілля в процедурі ОВД. / Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Т.1, №102, 37-47. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.102.1.37> URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/article/view/291905>

18. What is the state of nature in the EU? <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/state-of-eu-nature/>, Nature restoration <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/nature-restoration/>

19. Nature restoration law: Council gives final green light <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/06/17/nature-restoration-law-council-gives-final-green-light/>

20. Природоорієнтовані рішення (Nature-based solutions / NBS) <https://wwf.ua/our-work/nbs/>

21. Регламент ЄС про відновлення природи та шляхи провадження в Україні. Аналітична записка. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/06/17/nature-restoration-law-council-gives-final-green-light/>

Аніщенко Л. Я., д-р техн. наук, доц.;

Пісня Л. А., канд. техн. наук;

Свердлов Б. С.;

Барміна І. В.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРТНИХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Метод аналізу ієрархій американського математика Томаса Сааті (МАІ) [1, 2] розроблений для аналізу систем будь-якої природи, проведення багатовимірних та рейтингових оцінювань або кількісного зіставлення ієрархічно організованих систем показників.

У науковій практиці УКРНДІЕП МАІ успішно використовується для визначення пріоритетів у задачах комплексної оцінки впливу на довкілля та управління екологічною безпекою планованої діяльності за процедурами оцінки впливу на довкілля (ОВД), стратегічної екологічної оцінки (СЕО), екологічної експертизи, післяпроектного моніторингу (ППМ) та післяпроектного аналізу (ППА), який адаптовано співробітниками лабораторії оцінки впливу на довкілля, стратегічної екологічної оцінки та екологічної експертизи до застосування у сфері охорони довкілля і екологічної безпеки [3 - 5].

Широкі використання МАІ як одного з сучасних експертних методів прийняття управлінських рішень обумовлене багатьма чинниками, зокрема [6]:

- неможливістю кількісного вимірювання деяких показників;
- відсутністю відповідних вимірювальних приладів;
- складністю досліджуваних явищ;
- великими витратами коштів або часу при вимірюванні;
- відсутністю необхідних обсягів вірогідної інформації;
- суб'єктивністю досліджуваних характеристик тощо.

Суть МАІ [1, 2] полягає у декомпозиції складної проблеми у вигляді ієрархічної багаторівневої структури (*мета* - > *критерії* - > *підкритерії* - > *фактори* - > *альтернативи*), кожен рівень якої складається з окремих елементів; побудові

матриць попарних порівнянь елементів на підставі експертних суджень щодо ступеню переваги одного елементу пари над іншим у балах за шкалою попарних порівнянь (таблиця 1); подальшої математичної обробки експертних суджень, за результатами якої визначається відносний ступінь взаємодії або взаємозалежності елементів ієрархії, що виражається у числовій формі; визначенні узагальнених глобальних пріоритетів серед варіантів (альтернатив), що розглядалися. Окрім ієрархічної структуризації проблеми MAI вигідно відрізняється серед інших експертних методів поєднанням експертно-аналітичного підходу з використанням алгебраїчної теорії матриць, що дозволяє включити для розгляду всі наявні, навіть різномірні, дані та приймати рішення в умовах багатокритеріальності.

Таблиця 1 – Фундаментальна шкала відносної важливості факторів

Ступінь переваги	Визначення	Коментарі
1	Рівна перевага	Дві альтернативи однаково добрі з точки зору мети
2	Слабкий ступінь переваги	Проміжна градація між рівною і середньою перевагою
3	Середній ступінь переваги	Досвід експерта дозволяє вважати одну з альтернатив трохи кращою за іншу
4	Ступінь переваги вище середнього	Проміжна градація між середньою та помірно сильною перевагою
5	Помірно сильна перевага	Досвід експерта дозволяє вважати одну з альтернатив явно кращою за іншу
6	Сильна перевага	Проміжна градація між помірно сильною та дуже сильною перевагою
7	Дуже сильна (очевидна) перевага	Досвід експерта дозволяє вважати одну з альтернатив набагато кращою за іншу; домінування альтернативи підтверджено практикою
8	Дуже, дуже сильна перевага	Проміжна градація між дуже сильною та абсолютною перевагою
9	Абсолютна перевага	Очевидність величезної переваги однієї альтернативи над іншою має незаперечне підтвердження

Адаптація MAI включає розробку алгоритму метода, моделей типових для обраної сфери ієрархічних структур, таблиць вербальних характеристик (описів) елементів ієрархій та зв'язків між ними, модифікованої шкали відносної важливості факторів для попарного експертного оцінювання (зважування) елементів ієрархії (таблиця 2).

Ці розробки враховані у програмному продукті [7]. На відміну від більшості раніше розроблених програм передбачена побудова багаторівневих ієрархій з

практично необмеженою кількістю елементів та збереження усіх проміжних етапів, що дозволяє повертатись до попередніх кроків для виправлення помилок аналізу та вдосконалення результатів розрахунків. У програмному продукті також передбачено заповнення та уточнення таблиці вербального опису зв'язків між елементами суміжних рівнів ієрархії в ході проведення аналізу

Таблиця 2 – Модифікована шкала попарного експертного оцінювання (зважування) елементів ієрархії

Бал за шкалою Т. Сааті	Вербально-аргументована оцінка	Примітки (коментарі) щодо оцінювання елементів в ієрархії
0	Елементи не можуть бути порівняні з точки зору досягнення мети	Відсутність взаємного зв'язку та впливу
1	Елементи рівноцінні з точки зору досягнення мети	Елементи можуть бути порівняні але на підставі наявних даних неможливо надати перевагу одному елементу над іншим
2	Слабка перевага одного елемента над іншим	Перевага одного елемента над іншим ґрунтується на власному досвіді експерта, але для її підтвердження бракує надійних і достовірних даних
3	Середній ступінь переваги одного елемента над іншим	Перевага одного елемента над іншим ґрунтується на власному досвіді експерта та гарантовано підтверджується даними одного з показників (характеристик) (під гарантованим підтвердженням розуміється наявність надійних і вірогідних даних на користь одного елемента)
4	Перевага одного елемента над іншим є вищою за середній ступінь	Перевага одного елемента над іншим гарантовано підтверджується даними двох або більше, але менше половини, показників
5	Помірно сильна перевага одного елемента над іншим	Перевага одного елемента над іншим гарантовано підтверджується даними не менше, ніж половини показників, до того ж, не менш ніж половина усього масиву даних є надійною і достовірною
6	Сильна перевага одного елемента над іншим	Перевага одного елемента над іншим ґрунтується на 75% усіх даних і гарантовано підтверджується даними більш ніж половини показників
7	Очевидна (дуже сильна) перевага одного елемента над іншим	Перевага одного елемента над іншим є очевидною і практично підтвердженою або не викликає сумнівів.
8	Більш ніж очевидна перевага одного елемента над іншим, але ще не абсолютна	Перевага одного елемента над іншим не викликає сумнівів, але говорити про абсолютну перевагу не можна

Бал за шкалою Т. Сааті	Вербально-аргументована оцінка	Примітки (коментарі) щодо оцінювання елементів в ієрархії
9	Абсолютна перевага одного елемента над іншим	Перевага одного елемента над іншим беззаперечна та підтверджена всіма даними, включаючи похибку вимірювань

Відбір експертів – ключовий етап проведення експертизи [1, 2, 8]. Зокрема до експертів у галузі економічної безпеки підприємства [9] висуваються такі вимоги:

- глибокі спеціальні знання в області проведення експертизи;
- високий рівень загальної ерудиції;
- здатність до адекватного відображення тенденцій розвитку об'єкта дослідження, технологічна спрямованість на майбутнє;
- науковий інтерес до оцінюваного предмета, відсутність особистої зацікавленості в результатах оцінки;
- значний виробничий або дослідницький досвід в аналізованій сфері.

Також в [9] зазначається, що на практиці показником кваліфікації експерта інколи слугує ступінь відхилення його думки від усередненої думки інших експертів. Експерт вважається тим кращим, чим менше це відхилення, хоча бувають і винятки, коли має рацію тільки один експерт.

У сфері охорони довкілля та екологічної безпеки існують різні підходи до залучення експертів [5, 8]. Аналіз численних публікацій з цього приводу та спроб унормування вимог до експертів з проведення екологічної експертизи та процедур СЕО та ОВД засвідчив, що одностайність думок існує лише щодо необхідності залучення для цього групи експертів, тоді як кваліфікаційні вимоги складають широкий спектр, причому окремі позиції є несумісними між собою, як це впливає з наведеного нижче узагальненого переліку вимог:

1 - експерт має бути досвідченим фахівцем з вузького спектру питань щодо певної складової довкілля, а експертна група – об'єднувати фахівців з різних складових довкілля з умовою, що кожний фахівець самостійно формулює думку відповідно до наданого завдання;

2 - основні вимоги, як у п. 1, але накладається додаткова вимога про відсутність на час проведення експертизи, а також у минулому, участі у розробці будь-яких матеріалів ОВНС, СЕО та ОВД;

3 - експерт має бути фаховим екологом широкого профілю та, бажано, мати досвід у проведенні оцінки впливу господарської діяльності на довкілля, але не бути

причетним до розробки матеріалів CEO або ОВД оцінюваної діяльності; кожний фахівець самостійно формулює думку відповідно до наданого завдання;

4 - основні вимоги, як у п. 3, але вимога щодо відсутності зв'язку з розробкою матеріалів CEO або ОВД оцінюваної діяльності не накладається.

5 - експерти обираються з представників зацікавленої (місцевої) громадськості, які мають вищу освіту та загальну ерудицію у екологічній галузі; кожний залучений представник громадськості кожний фахівець самостійно формулює думку відповідно до наданого завдання;

6 – 10 - вимоги кожного з пунктів з 6-го по 10-ий є повторенням, відповідно, вимог пунктів з 1-го по 5-ий, але замість прийняття індивідуальних рішень передбачається співпраця усіх залучених експертів та формування спільних висновків за завданнями експертизи шляхом дискусійного обговорення суджень кожного з експертів та узгодження їх позицій.

Головним завданням експертів, які відбираються для проведення комплексної багатофакторної оцінки впливів господарської діяльності на довкілля та управління екологічною безпекою з використанням методу MAI, є визначення ступеню переваги одного з двох порівнюваних елементів ієрархії над іншим з аспектах досягнення загальної мети (вершини ієрархії) з врахуванням спектру можливих заходів (альтернатив найнижчого рівня ієрархії). Цей процес відбувається шляхом заповнення обернено-симетричних матриць попарних порівнянь з перевіркою внутрішньої формальної узгодженості кожної заповненої матриці за допомогою коефіцієнта узгодженості [1, 2] .

Виходячи з цього проаналізуємо недоліки і переваги відбору експертів для залучення до вирішення задач управління екологічною безпекою за кожною парою перелічених вище варіантів вимог (1 та 6, 2 та 7, 3 та 8, 4 та 9, 5 та 10).

Варіанти 1 та 6. Кожний з експертів, залучених за вимогами варіанту 1, скоріш за все, зможе сформулювати обґрунтовану думку лише з питань впливу на його фахову складову довкілля, але аж ніяк не з усього окресленого в ієрархії кола питань. Результатом їх оцінювання буде масив заповнених матриць, кожна з яких не відображає імовірного чи реального співвідношення значущості різних впливів на багатокомпонентне довкілля. Статистична обробка одержаного масиву матриць не призведе до істотного підвищення об'єктивності оцінок через явно недостатню для статистичних методів кількість досяжних для залучення фахівців.

Натомість, у разі переходу до варіанту 6 можна очікувати на одержання достатньо об'єктивних результатів експертизи з використанням методу MAI, оскільки кожний вузький спеціаліст має великі шанси переконливо обґрунтувати перед іншими членами експертної групи власне судження, якщо воно підкріплене професійним досвідом.

Варіанти 2 та 7. Вимога про відсутність на час проведення експертизи, а також у минулому, участі у розробці будь-яких матеріалів ОВНС, СЕО та ОВД виникла з бажання уникнути будь-якої можливості корупційних стосунків або спільних інтересів між експертами і суб'єктами господарської діяльності, але такі обмеження змушують обмежити пошук експертів лише фахівцями, які позбавлені жодного досвіду оцінювання впливів господарської діяльності на довкілля та для яких обмежена попередня обізнаність із законодавчою та методичною базою СЕО та ОВД може виявитися недостатньою для повноцінної участі у експертному аналізі з використанням методу MAI.

Лише у випадку, коли метод MAI застосовується на стадії експертизи проектних матеріалів планованої діяльності, є виправданою частина цієї вимоги, що стосується відсутності участі експерта у розробці матеріалів ОВНС, СЕО та ОВД саме цієї планованої діяльності,

У відношенні до інших вимог варіантів 2 та 7 залишається слушним усе, зазначене вище для варіантів 1 та 5.

Варіанти 3 та 8. Залучення до аналізу ієрархій за модифікованим методом MAI фахових екологів широкого профілю полегшує досягнення збалансованих оцінок впливів з обґрунтованим врахуванням усього комплексу факторів впливу та факторів довкілля, що піддаються впливу господарської діяльності. Вимога щодо відсутності участі експерта у розробці матеріалів ОВНС, СЕО та ОВД саме планованої діяльності, щодо якої проводиться експертиза, в обов'язковому порядку має застосовуватися лише під час проведення зовнішньої експертизи проектних матеріалів. Можливість вироблення спільних рішень (варіант 8) слід вважати додатковою сприятливою умовою для одержання об'єктивних оцінок.

Варіанти 4 та 9. Варіанти є привабливими з практичної точки зору під час розробки матеріалів СЕО, ОВД та ОВНС, оскільки передбачається можливість включення до складу експертних груп фахових екологів з числа розробників саме цих матеріалів. Ці фахівці, зазвичай, є найглибше зануреними у аналіз впливів даної господарської діяльності. Для запобігання проявам упередженого ставлення

розробників до експертного аналізу з використанням методу MAI, внаслідок контактів із замовником матеріалів, може бути доцільним окреме врахування їх суджень при визначенні пріоритетів.

Варіанти 5 та 10. Варіанти є найбільш складними в реалізації, оскільки одержання вагомих результатів від залучення громадських експертів є неможливим без витрачання великої кількості часу на їх попередню спеціальну підготовку. Тим не менш, застосування цих варіантів може відіграти велику роль у випадках, коли громадськість вимагає свого активного залучення до оцінювання наслідків господарської діяльності для довкілля та здоров'я людини або висловлює упереджено-негативні судження щодо екологічності проєктних рішень.

Варто зазначити, що варіант 5 може мати додаткову цінність у порівнянні з варіантом 10, оскільки за умов залучення достатньої кількості представників громадськості окрім врахування персональних суджень окремих громадян стає можливою їх статистична обробка.

На підставі виконаного аналізу пропонуються такі критерії залучення експертів до проведення експертно-аналітичних процедур за методом MAI:

- знання з ідеології та методики MAI, навички застосування методу експертних оцінок впливу на складові довкілля, обізнаність з практичним застосуванням адаптованого MAI для екологічних завдань;
- кваліфікація та/або досвід роботи за фахом «еколог», обізнаність стосовно визначень понять: критерії, фактори, умови, характеристики, параметри екологічного стану досліджуваних територій та їх практичного використання;
- навички роботи з аналітичними даними в галузі екологічної безпеки та природоохоронної діяльності, включаючи ГІС-карти досліджуваної території;
- обізнаність із законодавчою та методичною документацією щодо процедур екологічної оцінки впливу господарської діяльності;
- обізнаність з наявними матеріалами щодо складу та стану компонентів довкілля зони впливу оцінюваної господарської діяльності та місцевими екологічними проблемами.

У роботах Т. Сааті [1, 2] важливе місце відведено організації самого процесу попарного порівняння.

Передбачається, що попарні порівняння виконуються шляхом безпосереднього опитування осіб (або окремої особи, якщо завдання стосується лише її однієї), які можуть бути, а можуть і не бути експертами, але знайомі з проблемою. Центральним

моментом запропонованого Т. Сааті підходу є те, що пріоритети мають бути встановлені незважаючи на те, що судження окремих осіб часто не узгоджені.

Особі, яка висловлює судження, ставлять запитання такого типу: «Який елемент із запропонованої пари елементів матриці здається Вам більш наділений даною властивістю чи сприятливим для прояву даної властивості? Наскільки великим є це переважання за шкалою: рівне, слабе, сильне, очевидне чи абсолютне, або ж це переважання краще охарактеризувати компромісною величиною між суміжними значеннями?»

Питання має бути ретельно сформульоване, щоб виявити судження чи відчуття залучених осіб. Слід зберігати однаковість побудови питань. Важливо зосередити увагу на визначеннях властивостей, оскільки для людського мислення характерне прагнення до нечітких узагальнень.

Процедура може розпочатися з загострення уваги на рядках матриці у порядку переважання відповідних елементів, очікуючи, що особи, можливо, заздалегідь визначать порядок домінування елементів. Спочатку порівнюються найсильніший і найслабший елементи, щоб отримати орієнтир для інших величин.

У монографіях [1, 2] виокремлені такі етапи експертного процесу МАІ:

1. Сформулюйте завдання.
2. Поставте завдання у загальному плані – вставте її (якщо є потреба) у велику систему, що включає інші дійові особи, їх цілі та результати.
3. Ідентифікуйте критерії, що впливають на завдання.
4. Побудуйте ієрархію загальних критеріїв, приватних критеріїв, властивостей альтернатив та самих альтернатив.
5. У задачі з багатьма учасниками рівні можуть відноситися до навколишнього середовища, акторів, їх цілей, політики та результатів, з яких отримуємо узагальнений результат (стан сфери дії).
6. Щоб усунути неясність, ретельно визначте кожен елемент у ієрархії.
7. Встановіть пріоритети первинних критеріїв щодо їх впливу на загальну мету, яка називається фокусом.
8. Ясно сформулюйте питання для парних порівнянь у кожній матриці. Зверніть увагу на орієнтацію кожного питання, наприклад вартість повинна зменшуватися, а ефективність збільшуватися.
9. Встановіть пріоритети часткових критеріїв щодо своїх загальних критеріїв.
10. Введіть судження про попарні порівняння та їх зворотні величини.

11. Обчисліть пріоритети шляхом підсумовування елементів кожного стовпця та поділу кожного елемента на загальну суму стовпця.

Т. Сааті бачив низку переваг групового експертного аналізу [1, 2, 10]. Участь кількох людей дозволяє приходити до компромісних суджень під час попарного порівняння різних елементів, зокрема, шляхом зіставлення суджень осіб, які мають різний досвід.

Якщо в процесі беруть участь кілька осіб, то вони, на думку Т. Сааті, можуть допомагати одна одній в уточненні своїх думок, а також розділити між собою завдання так, щоб зробити судження в тих сферах, де вони є достатньо компетентними, доповнюючи одна одну. У намаганні досягти консенсусу особи, для яких певна порівнювана пара елементів не має особливого значення, можуть поступитися судженню інших осіб і, у свою чергу, попросити про подібні поступки у інших осіб стосовно тієї пари елементів, які для них є важливими.

Щоб уникнути подальших суперечок, перед тим, як розпочати визначення пріоритетів, необхідно спробувати записати визначення введених елементів.

Найкращий спосіб залучити велику групу людей [1, 2, 10, 11] – або вибрати вузьку мету для дискусії, або, що краще, заготувати для них деяку ієрархію для обговорення, а потім розділити їх на однорідні групи і дати можливість кожній групі робити судження по частинах ієрархії, які відображають їх особисті інтереси.

Наш досвід [5] свідчить, що досягнення консенсусу значно полегшується, якщо в якості модератора до експертної групи залучається системний аналітик у галузі екології.

У роботах [10, 11] стосовно прийняття рішень для підтримки групових процесів у поточному та майбутньому складному середовищі, показано, що МАІ є науковим підходом для підтримки групових процесів у поточному та майбутньому складному середовищі де «у нашому дедалі складнішому середовищі прийняття рішень стає все більш складним завданням для лідерів і практиків. Робота в групах здається нормою, тому що узгодження бачень і дій має вирішальне значення для організації. Лідеру або груповому фасилітатору потрібна система підтримки, щоб зробити колективне мислення ефективним».

У випадках, коли консенсусу досягти не вдається Т. Сааті вважає за доцільне застосовувати геометричне середнє індивідуальних суджень експертів у кожній матриці порівнянь [1, 2].

Висновки

У науковій практиці УКРНДІЕП для визначення пріоритетів у задачах комплексної оцінки впливу на довкілля та управління екологічною безпекою планованої діяльності успішно використовується метод аналізу ієрархій (MAI), який адаптовано до застосування у сфері охорони довкілля і екологічної безпеки.

Адаптація MAI включає розробку алгоритму метода, моделей типових для обраної сфери ієрархічних структур, таблиць вербальних характеристик (описів) елементів ієрархій та зв'язків між ними, модифікованої шкали відносної важливості факторів для попарного експертного оцінювання (зважування) елементів ієрархії.

Ці розробки враховані у створеному програмному продукті, у якому, на відміну від більшості раніше розроблених програм для реалізації MAI, передбачено побудову багаторівневих ієрархій з практично необмеженою кількістю елементів та збереження усіх проміжних етапів побудови ієрархії та розрахунків, що дозволяє повертатись до попередніх кроків для виправлення помилок аналізу та вдосконалення результатів розрахунків. У програмному продукті також передбачено заповнення та уточнення таблиці вербального опису зв'язків між елементами суміжних рівнів ієрархії в ході проведення аналізу.

Ключовим етапом реалізації MAI є відбір експертів. Головним завданням експертів, які відбираються для проведення комплексної багатофакторної оцінки впливів господарської діяльності на довкілля та управління екологічною безпекою з використанням методу MAI, є визначення ступеню переваги одного з двох порівнюваних елементів ієрархії над іншим з аспектів досягнення загальної мети (вершини ієрархії) з врахуванням спектру можливих заходів (альтернатив найнижчого рівня ієрархії). Цей процес відбувається шляхом заповнення обернено-симетричних матриць попарних порівнянь з перевіркою внутрішньої формальної узгодженості кожної заповненої матриці за допомогою коефіцієнта узгодженості.

Серед різних підходів до залучення фахових експертів, які застосовуються у сфері охорони довкілля та екологічної безпеки, найбільш доцільним для проведення експертно-аналітичних процедур з використанням MAI, на нашу думку, є відбір експертів за такими критеріями:

- знання з ідеології та методики MAI, навички застосування методу експертних оцінок впливу на складові довкілля, обізнаність з практичним застосуванням адаптованого MAI для екологічних завдань;

- кваліфікація та/або досвід роботи за фахом «еколог», обізнаність стосовно визначень понять: критерії, фактори, умови, характеристики, параметри екологічного стану досліджуваних територій та їх практичного використання;
- навички роботи з аналітичними даними в галузі екологічної безпеки та природоохоронної діяльності, включаючи ГІС-карти досліджуваної території;
- обізнаність із законодавчою та методичною документацією щодо процедур екологічної оцінки впливу господарської діяльності;
- обізнаність з наявними матеріалами щодо складу та стану компонентів довкілля зони впливу оцінюваної господарської діяльності та місцевими екологічними проблемами.

Найкращих результатів фахова експертна група може досягти за умов колективного обговорення експертного завдання, оскільки тоді кожний спеціаліст має змогу переконливо обґрунтувати перед іншими членами експертної групи власне судження, зроблене на підставі професійного досвіду.

Залучення громадських експертів до участі у проведенні експертно-аналітичних процедур з використанням МАІ пов'язано з додатковими труднощами, оскільки є неможливим без витрачання великої кількості часу на їх попередню спеціальну підготовку. Тим не менш, таке залучення може відіграти велику роль у випадках, коли громадськість вимагає свого активного залучення до оцінювання наслідків господарської діяльності для довкілля та здоров'я людини або висловлює упереджено-негативні судження щодо екологічності проєктних рішень. Крім того, залучення представників громадськості до експертно-аналітичних процедур уможливорює збільшення чисельності експертної групи та статистичну обробку персональних суджень окремих громадян.

Література

1. Saaty T.L. The analytic hierarchy process. Planning, Priority Setting, Resource Allocation – N.-Y.: McGraw Hill, 1980. – 288 p.
2. Saaty T L (1994). Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. RWS Publications, Pittsburgh, Pa. - 527p.
3. Аніщенко Л.Я. Застосування методу аналізу ієрархій у процедурі стратегічної екологічної оцінки/ Л.Я. Аніщенко, Л.А. Пісня, Б.С. Сverdlov //Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. пр. XV Міжнародної наук.-практ. конференції

- (м.Харків, 9-13 вересня 2019 р.)/ УкрНДІЕП. – Х.: ПП «Стиль-Іздат», 2019. - С. 14-17.
URL:<http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/Sbornik2020.pdf>
4. Аніщенко Л.Я., Свердлов Б. С. Багатокритеріальна комплексна оцінка впливів і управління екологічною безпекою водогосподарських систем методами системного аналізу // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVII Міжнародної наук.-практ. конф. (м. Харків, 13 – 17 вересня, 2021 рік)/ УКРНДІЕП. - ПП «Стиль-издат», 2021. – с.26-30.
URL:<http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/Sbornik2021.pdf>
5. Основні публікації / Лабораторія оцінки впливу на довкілля, стратегічної екологічної оцінки та екологічної експертизи. URL: <http://www.niiep.kharkov.ua/node/177>
6. Петруня Ю.Є., Літовченко Б.В., Пасічник Т.О. Прийняття управлінських рішень: навч. посібник. 3-тє видання, перероблене і доповнене. Дніпропетровськ, 2015. - 209 с.
7. Комп'ютерна програма «PROGRAM OF ANALYTICAL SYSTEM OF STRATEGIC ENVIRONMENTAL ASSESSMENT. ANALYTIC HIERARCHY/NETWORK PROCESS» / Л.А. Пісня, Л.Я. Аніщенко, Б.С. Свердлов, С.Б. Свердлов. Номер свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір: 121616, Дата реєстрації авторського права: 06.12.2023, Об'єкт авторського права, до якого належить твір: 16. Комп'ютерні програми, Дата публікації: 29.12.2023, Номер бюлетеня: 78, с.133. <https://ukrpatent.org/uk/articles/bulletin-copyright>.
8. Лисенко О.І., Яковлев Є.О., Чумаченко С.М., Пісня Л.А. Експертно-аналітичне оцінювання в задачах екологічної безпеки. Міфи та реальність // Зб. наук. пр. «Воєнно-екологічна думка». Вип. №2 «Актуальні проблеми екологічної безпеки військової діяльності». К.: ННДЦ ОТ та ВБ України. - 2007. С. 19-27.
9. Олексієнко Р.Ю., Донець А.О. Місце експертної оцінки у прийнятті управлінських рішень. Економіка та суспільство, 2021. Випуск 46/2021. С. 101–108. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/381>
DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-59>
10. Saaty T. L. Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences / T.L. Saaty, K. Peniwati. — Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 2008. — 385 p.
11. Peniwati, K. (2017). GROUP DECISION MAKING: DRAWING OUT AND RECONCILING DIFFERENCES. International Journal of the Analytic Hierarchy Process, 9(3). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v9i3.533>

Барбашев С. В., д-р техн.наук

Андрєєв Е. В., магістрант

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна

БЕЗПЕРЕРВНИЙ МОНІТОРИНГ ТРИТІУ У ЗОВНІШНІХ СКИДНИХ КОМУНІКАЦІЯХ АЕС, ЯК ГАРАНТІЯ СТАБІЛЬНОЇ І БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ СТАНЦІЇ

Сучасна атомна енергетика потребує підвищених вимог до безпеки експлуатації атомних електростанцій. Зовнішні системи скидних комунікацій енергоблоків, що відводять технологічну воду, є потенційними джерелами витоків радіоактивних речовин, зокрема тритію – радіоактивного ізотопу водню, який утворюється в процесі ядерних реакцій. Наприклад, на енергоблоці з ВВЕР-1000 напрацювання тритію за рік становить близько 700 ТБк [1]. На даний час очисних систем на АЕС, які можуть ефективно виділяти тритій з води, у світі не існує.

Тритій завдяки своїй високій рухливості та здатності входити до складу молекул води є ідеальним індикатором для виявлення навіть незначних порушень герметичності технологічних систем АЕС, що робить його моніторинг (контроль) критично важливим для своєчасного реагування на аварійні ситуації. Хоча β -випромінювання тритію слабке, його накопичення у ґрунтових водах чи водоймах поблизу АЕС може призвести до довгострокових екологічних наслідків. Водночас, існуючі станом на тепер на АЕС України методи моніторингу тритію не дозволяють експресно (скорочуючи час між взяттям проби та отримання відповіді) одержувати кількісну інформацію про зміст тритію у воді зовнішніх систем скидних комунікацій АЕС і, крім того, обмежуються складністю одержання та інтерпретації даних. Сказане вище підкреслює актуальність та необхідність проведення робіт щодо удосконалення методів моніторингу тритію з метою раннього виявлення малих витоків у зовнішні скидні системи АЕС, що дозволить підвищити радіаційну безпеку та знизити ризики для довкілля, населення та персоналу.

Метою даної статті є описання запропонованого авторами методу щодо експресного та безперервного визначення вмісту тритію у воді зовнішніх скидних комунікацій АЕС. Такий метод може підвищити ефективність моніторингу та мінімізувати екологічні ризики.

Об'єкт дослідження – скидні канали АЕС, в які спочатку потрапляють рідкі скиди з АЕС, що містять тритій, після чого він потрапляє до інших зовнішніх скидних комунікацій (водоймище-охолоджувач, водосховище, річка чи інші водні об'єкти), гідравлічно з'єднаних із скидними каналами. Для прикладу, у роботі розглянута система скидних комунікацій Запорізької АЕС (рис.1).

Поточний стан контролю тритію на АЕС України. Тритій (період напіврозпаду ~12 років) на АЕС утворюється під час роботи реактора за рахунок перебігу побічних реакцій поділу ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , а також унаслідок взаємодії нейтронів з Li, B, D. Його поява у воді другого контуру чи скидних систем є ознакою порушення цілісності контурів реакторної установки. Тому тритій може бути індикатором не тільки витоків з трубопроводів та обладнання першого та другого контурів АЕС, але й витоків у зовнішні системи скидних комунікацій, що важливо з точки зору його впливу на формування радіоекологічного стану навколо АЕС.

Контроль тритію на АЕС здійснюється сьогодні відповідно до чинного нормативного документу СОУ-Н ЯЕК 1.008:2008 [2]. Цим документом пропонується виконувати контроль тритію у двох режимах: поточного або розгорнутого моніторингу.

В першому випадку пропонується виконувати вимірювання вмісту тритію не менше 3 разів на рік у пробах води, відібраних у рекомендованих документом [2] створах водних об'єктів. Розгорнутий моніторинг проводиться при виявленні перевищення вмісту тритію у воді порівняно з адміністративно-технологічним рівнем (А-ТР) його скиду.

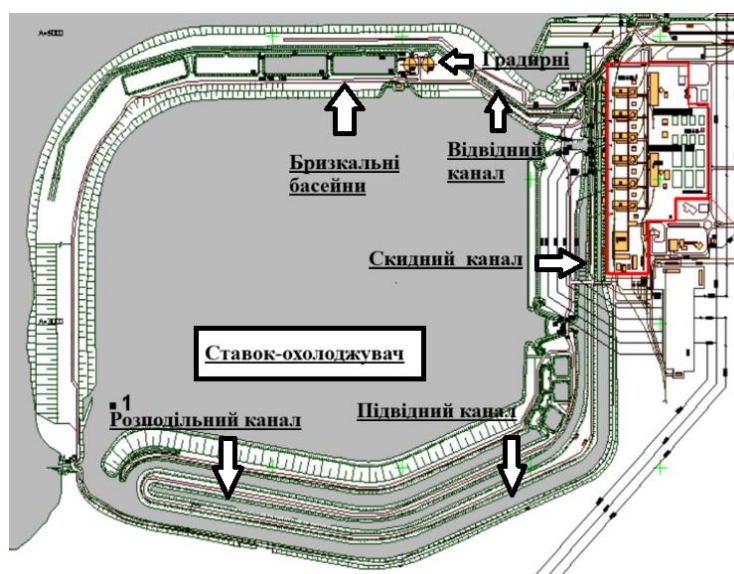


Рисунок 1 - Система зовнішніх скидних комунікацій на Запорізькій АЕС

Наприклад, на ЗАЕС він встановлений на рівні 12 ТБк/квартал. А-ТР не перевищує контрольного рівня (КР) для скиду тритію, який для ЗАЕС дорівнює 18 ТБк/квартал. Допустимий рівень скиду тритію на ЗАЕС дорівнює 1900 ТБк/рік [3]. Частоту відбору проб та вимірювання вмісту тритію встановлюють з урахуванням гідрологічного режиму, сезону року, динаміки водних мас у водних об'єктах та інших характеристик, які важливі для визначення причин і динаміки зміни активності тритію.

Вимірювання вмісту тритію в пробах води на АЕС України здійснюється шляхом регулярного відбору проб води зі скидних каналів та прилеглих водойм (як правило, щоквартально) з подальшим лабораторним аналізом цих проб методом рідинної сцинтиляції на рідинно-сцинтиляційному спектрометрі-радіометрі Quantulus 1220 чи Tri-Carb. Прилади дозволяють вимірювати вміст тритію без пробопідготовки на рівні від 1 Бк/л.

Такий підхід забезпечує високу чутливість вимірювань, проте має істотні обмеження: він не дає безперервної картини щодо динаміки вмісту тритію між відборами проб води. В інтервалах між ними невеликі витoki можуть залишитися непоміченими, а час лабораторного аналізу, який триває не менше 500 хвилин, не дозволяє оперативно реагувати на позаштатні протікання. Таким чином, наявний епізодичний контроль тритію, хоча і виконує вимоги нормативного документу [2], але не гарантує виявлення раптових або короточасних витоків у режимі реального часу.

Стан та потенційні проблеми існуючих скидних комунікацій. Скидний внутрішній трубопровід енергоблоку АЕС з ВВЕР призначений для відведення технологічної води з турбінного відділення до скидного каналу, а потім до водойми-охолоджувача. Хоча при проектуванні ці комунікації розраховуються як герметичні, з часом можливе зношення ущільнень, корозія металу або утворення мікротріщин, що призводить до витоків. Навіть незначний витік води першого контуру (насиченої тритієм) у систему скиду спричиняє появу тритію у дренажній воді. Якщо такий витік не виявити вчасно, радіоактивна вода може потрапити у ґрунтові води або поверхневі водойми.

Основний внесок тритію, який потрапляє у зовнішній скидний канал формується переважно за рахунок дебалансних вод з контрольних баків СВО, продувних вод систем технічного водопостачання відповідальних споживачів та дебалансних вод бака радіаційного контролю хімоводоочищення.

Системи контролю тритію, що застосовуються на українських АЕС, за період експлуатації станцій не зафіксували наднормативних перевищень тритію у воді

зовнішніх скидних комунікацій. Наприклад, на ЗАЕС середня об'ємна активність тритію за період 2011-2020 років знаходилася на рівні $\sim 1,5 - 2,0$ Бк/м³, що відповідає скиду на рівні 30 - 50 ТБк/рік, тобто значно нижче ДС та КР. Однак, існуючі методи контролю, які застосовують періодичний відбір проб води, не гарантують своєчасного виявлення повільних або періодичних витоків, що можуть статися між плановими перевірками. Отже, існує потреба у створенні такої системи контролю, яка постійно моніторить тритій у скидній воді та негайно сповіщає про будь-які відхилення від норми. Саме цей висновок став відправною точкою для розробки яка представлена у даній статті.

Суть запропонованого рішення щодо безперервного вимірювання тритію у воді зовнішніх скидних комунікаціях. Прилади для безперервного визначення вмісту тритію у проточних водах на АЕС в даний час не застосовуються. Це пов'язано з тим, що тритій є чистим бета-випромінювачем з низькою енергією (максимальна енергія 18 кеВ), що робить пряме безперервне автоматизоване вимірювання його вмісту в проточній воді досить складним технічним завданням. Тому виміри активності тритію проводяться за допомогою низькофонових рідинно-сцинтиляційних спектрометрів, таких, як QUANTULUS 1220 чи TRI-CARB. Для таких приладів час на підготовку проби і вимірювання становить біля 500 хвилин. Як було сказано вище, такий метод контролю не гарантує виявлення раптових або короточасних витоків, а також не дозволяє спостерігати динаміку розповсюдження тритію у поверхневих водних об'єктах у режимі реального часу.

Для експресного та безперервного визначення вмісту тритію у воді зовнішніх скидних комунікацій ми пропонуємо використовувати вимірювальні прилади із проточними детекторами. В таких приладах вода безперервно подається на детектор, який може бути пропорційним лічильником або сцинтиляційним детектором. Це дозволяє проводити безперервний моніторинг вмісту тритію. Вибір детектора залежить від необхідної точності, швидкості вимірювання, концентрації тритію у воді та інших факторів. Наприклад, прилади на основі пропорційних лічильників використовуються для вимірювання рівня тритію у воді в режимі реального часу в системах охолодження ядерних реакторів. Прилади на базі сцинтиляційних детекторів можна використовувати в різних сферах, включаючи моніторинг навколишнього середовища та контроль технологічних процесів.

До приладів для безперервного визначення вмісту тритію та інших радіонуклідів у стічних і підземних водах, а також у технологічних трубопроводах об'єктів атомної

енергетики, відносяться радіометри проточні рідинні Wilma (далі - радіометр Wilma), які виробляються фірмою «LabLogic Systems Limited» у Великобританії [4].

Принцип роботи радіометра Wilma полягає в безперервному або дискретному відборі рідини в проточний канал радіометра і реєстрації іонізуючих частинок, системою детектування.

Система детектування радіометра являє собою проточну сцинтиляційну комірку, встановлену між фотокатодами двох ФЕП, розташованих під кутом 180° один до одного. Можуть використовуватися два типи проточних комірок: проточні комірки, заповнені твердими частинками сцинтилятора, і комірки, в які подається коктейль вимірюваної рідини та рідкого сцинтилятора (РС). Комірки є змінними.

Для подачі досліджуваної рідини і РС-коктейлю радіометр оснащений внутрішніми насосами. Після того, як вимірювана рідина надходить в комірку з твердим сцинтилятором або після автоматичного змішування вимірюваної рідини і коктейлю РС в заданій пропорції, вимірюється активність отриманої лічильної проби. Після закінчення вимірювань зразок автоматично подається в бак або лінію для відходів, вимірювальна система промивається спеціальним розчином миючого засобу і прилад готовий до наступного циклу вимірювання.

При відповідному налаштуванні радіометр може працювати в автоматичному режимі протягом декількох тижнів, що особливо важливо при установці приладу у важкодоступних місцях.

Для візуального огляду радіонуклідів, що вимірюються, у радіометрі може бути встановлений спектрометричний режим роботи.

Результати вимірювань, стан та інформація про параметри системи виводяться на дисплей, розташований на передній панелі радіометра. Радіометр має вбудований планшетний комп'ютер. Інтерфейс користувача дозволяє працювати локально за допомогою сенсорного екрану монітора або віддалено. On-line режим роботи приладу дає можливість вихідний сигнал від нього передавати на щит радіаційного контролю енергоблоку для обробки результатів та сповіщення персоналу у разі перевищення контрольних чи допустимих рівнів.

У технічній документації до радіометра Wilma наводиться діапазон вимірювання питомої активності тритію у воді, який дорівнює $10^4 - 10^{11}$ Бк/л. Але вказується, що сертифікаційні випробування із встановлення основних метрологічних характеристик приладу були проведені з пробами тритієвої води з об'ємною активністю понад 10^2

Бк/л. Інформації про те, які найнижчі значення питомої активності тритію у воді може вимірювати радіометр Wilma, автори статті не знайшли.

Для того, щоб переконатися в тому, що радіометр Wilma може підійти для безперервного моніторингу тритію у воді зовнішніх скидних комунікацій, в яких питома активність тритію знаходиться на рівні менш за 10^2 Бк/л, треба провести відповідні випробування з метою встановлення основних метрологічних характеристик приладу в реальних умовах безперервної роботи в зовнішніх скидних комунікаціях.

Таким чином, при реалізації запропонованого технічного рішення із застосуванням радіометра Wilma стає можливим проводити безперервний моніторинг активності тритію в скидних комунікаціях в режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на появу навіть незначних витоків та забезпечувати безпечну роботи блоку. Але придатність радіометра Wilma для моніторингу тритію у скидних комунікаціях АЕС потребує додаткових досліджень.

Вибір ділянки контролю. Для впровадження запропонованого методу безперервного вимірювання вмісту тритію у воді скидних комунікаціях АЕС пропонується обрати коротку ділянку скидного трубопроводу довжиною приблизно 200 м від АЕС до випускного каналу (Рис.2).

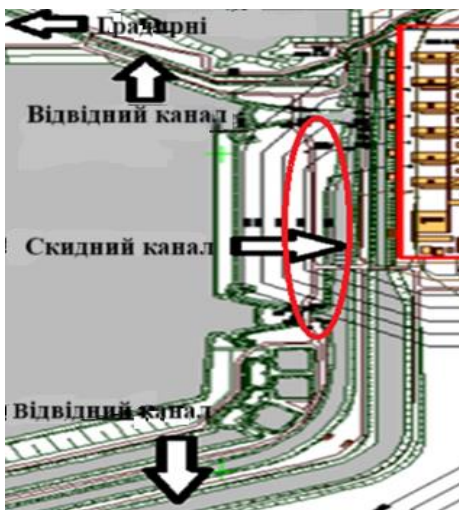


Рисунок 2 – Ділянка скидного каналу Запорізької АЕС для безперервного вимірювання вмісту тритію

Ця ділянка повинна містити оглядовий колодязь (інспекційну шахту), що забезпечує зручний доступ до внутрішньої порожнини трубопроводу для монтажу обладнання. Окрім того, місце її розташування треба вибрати неподалік від контрольного створу на виході води до водойми-охолоджувача, яка за нормативами знаходиться в межах

500 м від місця скиду. Установка датчиків саме на цій ділянці дає змогу виявляти аномальні викиди ще до потрапляння води до водойми-охолоджувача. Вибір 200-метрового сегменту зумовлений також тим, що він охоплює найбільш критичні вузли трубопроводу – стики, повороти, оглядовий колодязь – де ризик порушення герметичності підвищений. При цьому довжина сегменту достатньо мала, щоб локалізувати можливий витік у межах контрольованої зони. Відзначимо, що світовий досвід свідчить про доцільність розміщення датчиків саме поблизу вихідних шахт або перед впуском у відкритий скидний канал. Запропонований підхід повністю відповідає цим рекомендаціям, оскільки вибрана ділянка є критичною з точки зору контролю і водночас зручною для монтажу обладнання.

Організаційно-технічна схема впровадження. Впровадження системи безперервного контролю тритію на вибраній ділянці здійснюється у кілька послідовних етапів. Першим кроком є підготовка байпас-лінії: в зоні оглядового колодязя до основного трубопроводу під'єднується обвідний контур малого діаметра, що відбирає частину потоку води, пропускає її через вимірювальну камеру з детекторами і повертає назад у магістраль. Така байпас-лінія дозволяє виконувати вимірювання без перерви основного потоку і підтримувати стабільну малу витрату води через детектори (близько 5–10 л/хв) для забезпечення високої чутливості контролю.

На другому етапі у вимірювальному блоці байпас-лінії встановлюються три незалежні детектори для контролю концентрації тритію. Обрана триплексна конфігурація має кілька переваг: по-перше, підвищується надійність системи (у разі відмови одного датчика контроль все одно здійснюється двома іншими); по-друге, усереднення сигналів трьох каналів зменшує статистичну похибку вимірювань; по-третє, реалізовано алгоритм подачі тривожного сигналу «2 з 3», що мінімізує ймовірність хибних спрацьовувань.

На завершальному етапі вимірювальний блок підключається до інформаційно-контрольної системи АЕС. Сигнали з детекторів надходять до щита радіаційного контролю АЕС, що забезпечує моніторинг у реальному часі з автоматичною фіксацією перевищень заданих порогів і оповіщенням персоналу.

Доцільність розробки та впровадження системи безперервного контролю тритію. Запропонований метод безперервного контролю тритію має низку переваг. Передусім, вчасне виявлення витоків дозволяє знизити ризик розвитку аварійної ситуації і тим самим уникнути величезних витрат на ліквідацію її наслідків. Друга перевага – операційна стабільність: безперервний контроль запобігає

незапланованим зупинкам енергоблоку, забезпечуючи безперервне виробництво електроенергії та виконання графіка генерації. Окрім того, впровадження такої системи гарантує дотримання встановлених норм радіаційної безпеки. У сукупності ці факти означають, що запропонований метод безперервного контролю тритію крім того, що запобігає потенційним витратам, ще і забезпечує стабільну і безпечну роботу АЕС.

Що стосується витрат на розробку та впровадження запропонованого методу моніторингу тритію на АЕС України, то це питання потребує подальших досліджень.

Висновки

Для раннього виявлення витоків тритію з трубопроводів та обладнання першого та другого контурів АЕС та його витоків у зовнішні скидні комунікації система моніторингу тритію, яка в даний час застосовується на АЕС, потребує розширення та доповнення системою безперервного моніторингу проточних вод.

У перспективі необхідно оснастити зливні комунікації АЕС автоматизованими системами безперервного визначення вмісту тритію в стічній воді, що дозволить підвищити радіаційну безпеку АЕС та знизити ризики для довкілля, населення та персоналу.

Література

1. Долін В.В., Пушкаръов О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Тритій у біосфері/ Під ред. Е. В. Соботовича та В.В. Доліна. - К.: Наукова думка 2012 - 224 с.
2. СОУ-Н ЯЕК 1.008:2008. Моніторинг тритію у поверхневих водних об'єктах, гідравлічно з'єднаних із скидними каналами та водоймами-охолоджувачами АЕС України. – К.: Мінпаливенерго України, 2008 – 22 с.
3. 21.5.59.ОППБ.14. Звіт з періодичної переоцінки безпеки енергоблоку №5 ВП ЗАЕС. Фактор безпеки №14. Вплив експлуатації на навколишнє середовище. - К.: ДП НАЕК, 2019 – 241 с.
4. «LabLogic Radiation Detection Online Water Quality Monitoring System», United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-13/228.

Белоконь К. В., канд. техн. наук, доц.;

Книрик В. В., здобувач освіти бакалаврського рівня четвертого року навчання за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Аданік О. О., здобувач освіти бакалаврського рівня другого року навчання за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна

МЕТОДИ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ СТИЧНИХ ВОД

Очищення високомінералізованих стічних вод до стану, придатного як для технологічного, так і для побутового використання, прийнято називати знесоленням. Знесолення стічної води може бути здійснене шляхом вилучення власне молекул води з розчину, або видаленням іонів солей. Енергетичні витрати у другому випадку у багато разів більші, ніж у першому, хоча теоретично вилучення солей має бути менш енергоємним.

В даний час відома велика кількість способів виділення солей із розчину. Залежно від властивостей та фізико-хімічного складу стічних вод застосовуються різні методи їх знешкодження [1]:

- механічні – виділення механічних домішок шляхом фільтрування (через пісок, гравій, кокс тощо) та відстоювання (простого та із застосуванням хімічних реагентів для прискорення осадження суспензій);

- хімічні – вилучення з води шкідливих компонентів за відповідних хімічних реакцій (реагентні методи);

- фізичні – поділ молекул солей і води внаслідок дії фізичних сил (зворотний осмос, електродіаліз, термічне знесолення, геліоопріснення, кріоопріснення та ін.);

- фізико-хімічні – екстракція різними розчинниками, іонний обмін, поглинання шкідливих компонентів сорбентами (активоване вугілля, силікагель та ін.);

- біохімічні – використання життєдіяльності бактерій та інших найпростіших організмів, що засвоюють шкідливі компоненти, та ін. (біологічне очищення в біопрудах та в біоінженерних спорудах).

Для зручності аналізу методи демінералізації (знесолення) розбиті на чотири групи [2].

До першої групи належать такі методи як знесолення зворотним осмосом, термічне знесолення та іонний обмін, що отримали останнім часом широкий розвиток.

До другої групи належать такі методи як електродіаліз, геліоопріснення та реагентні способи опріснення.

До третьої групи належать методи, які поки що мало використовуються для знешкодження високомінералізованих стічних вод: це біологічне очищення в біологічних ставках і біоінженерних спорудах, кріоопріснення, фільтрація через ґрунт, торф, штучні суміші.

Методи, що належать до четвертої групи, застосовуються епізодично і, загалом, не придатні для цілей демінералізації та очищення великих об'ємів води: це електрокоагуляція, вакуумування та центрифугування.

Однак, наявні методи очищення стічних вод у багатьох випадках недостатньо ефективні або зовсім непридатні. Метод знешкодження стічних вод може вважатися задовільним, якщо він забезпечує зниження концентрації шкідливих речовин до значень, менших гранично допустимих, і дозволяє отримувати високі кінцеві концентрації розчинів. Жоден із зазначених методів не відповідає повністю пред'явленим вимогам. Так, мінералізовані води в більшості випадків не можуть знешкоджуватись механічними та біохімічними методами. Фізико-хімічні методи дають можливість знесолювати стічні води, проте ступінь концентрування розчинів при цьому обмежена. Зі збільшенням останньої суттєво зростають витрати енергії.

Велика різноманітність сольового складу стічних вод і відмінність у потужності та цільовому призначенні знешкоджувальних установок не дозволяють вибрати будь-який один універсальний метод очищення, який можна було б застосувати з максимальною економічною ефективністю практично в будь-яких умовах.

Зворотний осмос є найпоширенішим методом знесолення високомінералізованих вод. Метод опріснення зворотним осмосом заснований на фільтруванні солоної води через напівпроникні мембрани, що пропускають воду, але затримують гідратовані іони розчинених солей. Процес перенесення води через напівпроникну мембрану здійснюється в напрямку, протилежному осмотичному перенесенню, при тиску, що перевищує осмотичний. Цей метод застосовується для знесолення вод із вмістом солі до 40 г/л.

До переваг зворотного осмосу в порівнянні з іншими методами поділу можна віднести:

1) Теоретично високий коефіцієнт корисної дії, так як відсутність фазової рівноваги при зворотному осмосі зберігає енергію, яка витрачається лише на подолання втрат на тертя розчину, що протікає через апарат, на перенесення фільтрату через мембрану та на термодинамічну роботу виділення речовини.

2) Можливість використання мембранної фільтрації для поділу багатоконпонентних систем.

3) Зворотний осмос забезпечує очищення до рівня необхідного солевмісту, а застосування робочої схеми кількох паралельно працюючих зворотньоосмотичних модульних установок може забезпечити необхідну продуктивність.

Слід також враховувати такі недоліки роботи схем зворотньоосмотичних установок:

1) 20 – 30 % води припадає на концентровану (розсіл), утилізація якої потребує додаткових витрат, а в деяких випадках утилізація неможлива;

2) при паралельно працюючих зворотньоосмотичних установках можливе збільшення енерговитрат на створення високих напорів у кожній установці;

3) постійне підкислення води, яке потрібне для витримування робочих параметрів очищення та застосування у зв'язку з цим спеціального кислотостійкого обладнання, швидке зношування кислотостійких труб та арматури можуть призвести до додаткового подорожчання всього блоку очищення в цілому.

Хоча ще зовсім недавно термічне знесолення вважалося безперспективним напрямом для наукових досліджень через його енергоємність, проте простота експлуатації установок за умови використання викидної енергії, наприклад, теплоелектростанцій, АЕС та металургійних агрегатів, зумовила вдосконалення та здешевлення зазначеного способу, відкривши перед ним нові можливості. Цей метод знесолення є найпоширенішим методом знесолення та застосовується у всіх країнах світу. Застосування даного методу доцільно на великих установках при мінералізації вихідної води більше 1,5% для знесолення води будь-якого складу.

До переваг схем очищення високомінералізованих стічних вод з використанням термічного методу слід віднести:

1) високий ступінь розробленості обладнання та тривалий досвід його експлуатації;

2) високий ступінь знесолювання води, що знешкоджується, і в деяких випадках отримання не розсолів, які вимагають додаткової обробки, а солей у твердому вигляді.

До недоліків цих схем знесолення належать:

- 1) висока енергоємність;
- 2) підвищені вимоги до матеріалів обладнання;
- 3) часткова необхідність додаткової хімічної обробки води з метою зниження утворення накипу.

Широке поширення для пом'якшення та знесолення природної води набув метод іонного обміну. Для знесолення метод застосовується переважно з використанням солонуватих вод із загальним солевмістом до 2 – 3 г/л.

Метод опріснення води іонним обміном заснований на застосуванні спеціально виготовлених зернистих матеріалів – катіонітів та аніонітів, що сорбують з оброблюваної води катіони та аніони розчинених солей.

Катіоніти – практично нерозчинні у воді матеріали, що являють собою солі або кислоти з нерозчинним твердим аніоном; катіон здатний вступати в певних умовах в обмінну реакцію з катіонами розчину, в якому знаходиться катіоніт. В результаті цієї реакції катіоніт сорбує з розчину катіони, замінюючи їх на еквівалентну кількість катіонів, якими катіоніт був попередньо заряджений.

Аніоніти являють собою основи або солі з твердим нерозчинним катіоном. Аніони аніоніту здатні обмінюватися на аніони розчину, замінюючи їх еквівалентною кількістю аніонів, якими аніоніт був попередньо заряджений.

Процеси очищення іонообмінним методом відпрацьовуються на виробничих стічних водах багатьох виробництв. Продуктивність комплексу дослідних установок – 25 – 50 м³/год, або 600 – 1200 м³/добу. Процес складається з п'яти ступенів механічного очищення (усереднення, нейтралізація, фільтрація на кварцових фільтрах, флотація, фільтрація на волокнистому фільтрі) та п'яти ступенів іонообмінного очищення (очищення від іонів Zn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺).

До переваг методу можна віднести:

- 1) високий ступінь вибіркової вилучення речовин із стічної води на молекулярному рівні;
- 2) перспективність у сфері подальшої утилізації вилучених речовин;
- 3) при правильному доборі іонітів можна досягти практично повного видалення заданих елементів, а знесолення загалом довести до рівня бідистильованої води.

Необхідно враховувати такі негативні моменти роботи іонообмінних установок:

- 1) наявність додаткових обсягів регенераційних вод;
- 2) складність схеми інженерних комунікацій;
- 3) висока вартість іонообмінних смол;

4) наявність розсолів, які потребують подальшої обробки.

З розглянутих вище методах знешкодження високомінералізованих стічних вод можна зробити висновок, що найбільш перспективним та ефективним методом знешкодження високомінералізованих стічних вод є метод термічного знесолення, оскільки використання інших методів, як правило, пов'язане з необхідністю вирішення низки проблем. Для методів зворотнього осмосу та електродіалізу це високі енерговитрати, необхідність попередньої водопідготовки (очищення від завислих речовин тощо) та утилізація висококонцентрованих розсолів; для методів іонного обміну – необхідність водопідготовки та висока вартість сорбентів, для кріоопріснення – висока вартість холодоагентів та необхідність утилізації висококонцентрованих розсолів; для реагентних методів – необхідність відчуження великих площ земель та утилізації опадів; для геліоопріснення – обмеженість застосування зон з аридними умовами.

Література

1. Сучасні підходи очищення стічної води біотехнологічних виробництв. Промислова екологія [Електронний ресурс] / [Струтинська А.В., Косоголова Л.О., Гаркава В.Г., Нежанківська В.Є.]. Київ: Ековидавництво, 2011. Режим доступу: <http://eco.com.ua/content/suchasni-pidkhodi-ochishchennya-stichnoi-vodibiotekhnologichnikh-virobnitstv>
2. Промислова екологія: [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://pidruchniki.com/1584072041610/ekologiya/promislova_ekologiya

Белоконь К. В., канд. техн. наук, доц;

Розсоха К. В., здобувач освіти магістерського рівня першого року навчання за спеціальністю G2 «Технології захисту навколишнього середовища»

Зубко Ю. Г., здобувач освіти бакалаврського рівня першого року навчання за спеціальністю G2 «Технології захисту навколишнього середовища»

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна

ЕКОЛОГІЧНА НЕБЕЗПЕКА ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Проблема утилізації, переробки, знешкодження або використання відходів є однією з самих актуальних проблем сучасності. Зменшення екологічного збитку, що наноситься навколишньому середовищу, а також ступінь утилізації виробничих і побутових відходів, є найважливішим показником рівня технологічного розвитку країни. У зв'язку зі стрімким зростанням споживання усе більш актуальною стає проблема поводження з відходами. З кожним роком кількість твердих побутових відходів (ТПВ) у світі неухильно зростає.

Ситуація в області утворення, знешкодження, збереження, використання та поховання відходів, що склалася в Україні, веде до небезпечного забруднення навколишнього середовища, нераціонального використання природних ресурсів, значного економічного збитку та являє реальну загрозу здоров'ю сучасного і майбутнього поколінь країни.

В даний час Україна майже «завалена» величезною кількістю ТПВ. Кількість сміття, що накопичується, постійно зростає. Зараз на кожного громадянина України приходить від 150 до 600 кг ТПВ на рік. У нашій країні проблемі розміщення ТПВ не приділяється належної уваги. 80% усіх відходів, що утворюються, розміщується на полігонах і смітниках. Серед існуючих 750 полігонів (точніше смітників), багато заповнено на 60-90%, а деякі - переповнені і повинні бути закриті [1]. Переважна більшість полігонів твердих побутових відходів не відповідають умовам санітарних норм.

Існуючі полігони, а точніше смітники ТПВ, являють собою значну екологічну небезпеку, що буде діяти ще десятки років. Основна проблема такого методу поводження з ТПВ як розміщення їх на полігонах полягає в тому, що при складуванні

багатокомпонентних відходів при визначених сприятливих умовах у тілі полігона протікають непередбачені фізико-хімічні та біохімічні процеси, продуктами яких є численні токсичні хімічні сполуки у твердому, рідкому і газоподібному стані. Дані з'єднання являють собою додаткову екологічну небезпеку.

Незважаючи на значну розмаїтість існуючих методів утилізації ТПВ, у нашій країні в силу ряду причин ще багато років основним напрямком поводження з відходами буде розміщення їх на полігонах. Тому основні розробки повинні бути спрямовані на модернізацію старих і будівництво нових екологічно безпечних об'єктів складування ТПВ. Такі об'єкти повинні забезпечувати максимальний захист навколишнього середовища.

При проектуванні полігонів ТПВ доцільно передбачати утилізацію біогазу. Біогаз – суміш газів, що утворюється при анаеробному розкладанні органічної складової ТПВ. Біогаз може використовуватись як паливо для енергетичних установок (котлоагрегати, промислові печі, стаціонарні двигуни-генератори) або для заправки в балони. Метод утилізації біогазу визначається під час розроблення технічного завдання на проектування системи збирання й утилізації біогазу для конкретного полігона ТПВ [1].

Основні операції з експлуатації полігонів наведено на рис. 1. На полігоні виконуються наступні основні види робіт: прийом, ущільнення та ізоляція ґрунтом ТПВ. Дотримання цієї послідовності операцій забезпечить виконання вимог екологічних нормативів. Але і при цьому можливі аварійні ситуації, які можуть привести до забруднення навколишнього середовища.

При експлуатації полігонів виділяються шкідливі гази, що дурно пахнуть та забруднюють повітря, і створюють небезпеку пожеж, вибухів (CH_4 , CO_2 , H_2S). Також виділяється надзвичайно небезпечний фільтрат, що забруднює ґрунт і ґрунтові води, кількість бактерії кишкової групи складає до 34 тис. на 1 см^3 , загальне число бактерій 1,5 млн. на 1 см^3 . При висиханні відходів утворюється пил, у тому числі і токсичний. У смітті зустрічаються збудники патогенної мікрофлори, туберкульозу, патогенні стафілококи і стрептококи, а до повного розкладання можливість забруднення зовнішнього середовища зберігається 50-100 років.

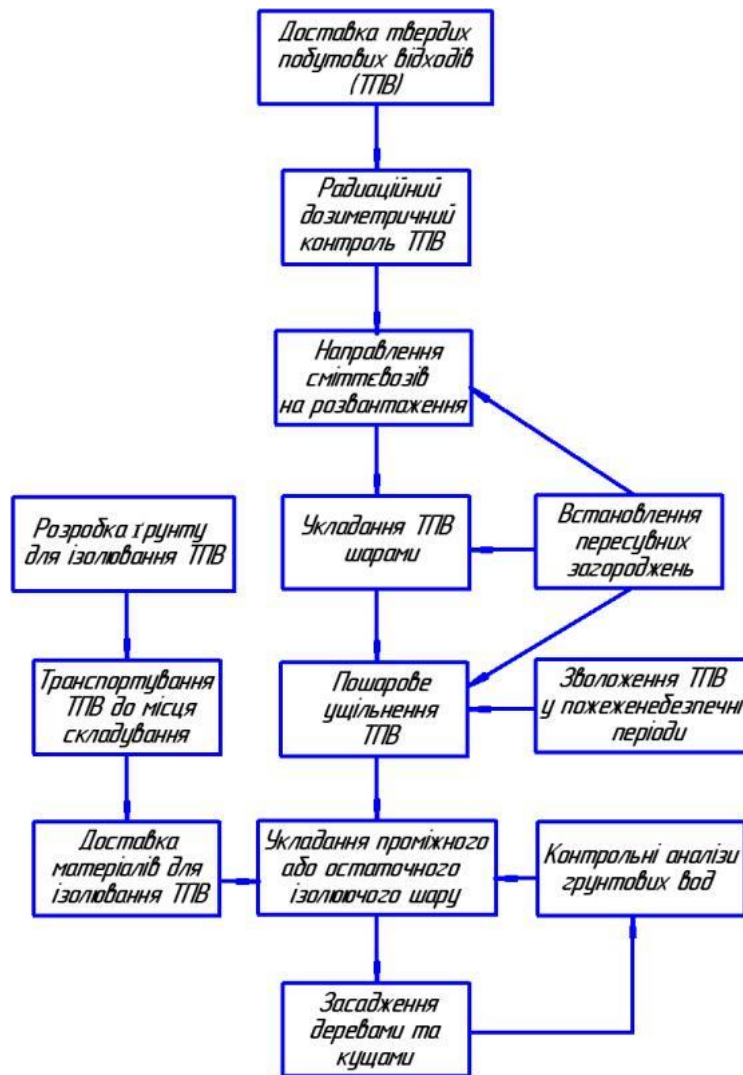


Рисунок 1 – Основні операції з експлуатації полігонів

Однак, на полігонах можливо дотримувати санітарно-гігієнічні умови, здійснювати контроль фільтраційних витоків і викидів газу за допомогою моніторингу, а також застосовувати інженерні методи підготовки місць складування, чим забезпечується екологічна безпека. Але і при цьому можливі осідання ґрунту, фільтраційні витoki, аварійні ситуації які можуть привести до забруднення навколишнього середовища. Таким чином, полігони складування ТПВ є об'єктами високого екологічного ризику забруднення навколишньої природного середовища.

Література

1. Горун М. В., Пиріг Г. І., Файфура В. В., Федірко М. М. Екологія : навч. посіб. Тернопіль : Економічна думка, 2019. 156 с.

Борисенко О. М.¹, д-р техн. наук, проф.,

Логвінков С. М.², д-р техн. наук, проф.,

Іщенко А. М.¹,

Ареф'єв В. О.¹

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

²Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ СКЛАДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ВИРОБНИЦТВА ПЕРИКЛАЗОШПІНЕЛЬНИХ ВОГНЕТРИВІВ

Останніми роками периклазошпінельні вогнетриви привертають значну увагу як екологічно безпечна альтернатива периклазохромітовим матеріалам. Численні дослідження довели, що такі вогнетриви забезпечують довший термін служби в умовах експлуатації обортових цементних печей та, головне, виключають утворення токсичних сполук Cr^{6+} . У зв'язку з цим розробка нових складів і вдосконалення технологій виробництва периклазошпінельних матеріалів є одним із ключових напрямів сучасного вогнетривкового матеріалознавства.

Основна увага дослідників зосереджується на вивченні фізико-технологічних властивостей периклазошпінельних матеріалів, що визначаються мікроструктурою, а також впливу різних добавок на їх експлуатаційні характеристики.

Оксид магнію (периклаз) є базовим компонентом завдяки високій хімічній стійкості у контакт з цементним клінкером. Водночас вогнетриви з чистого MgO характеризуються низькою термічною стабільністю. Для її підвищення додають компоненти з іншим коефіцієнтом теплового розширення (корунд, шпінель), що покращує термостійкість, а також тонкоподрібнені добавки ZrO_2 та TiO_2 , які сприяють утворенню високотемпературних фаз та підвищують міцність.

Результати роботи [1] показали, що алюмовмісні добавки (електрокорунд, глинозем, спечена та плавлена шпінель) незначно впливають на пористість і щільність, але істотно змінюють механічні властивості. Зокрема, плавлена шпінель з оптимальним вмістом Al_2O_3 забезпечила найкращі показники міцності при стиску та згині за кімнатної температури та при 1300°C , а також високу термостійкість.

Натомість глинозем та електрокорунд показали знижену стійкість до дії цементного клінкеру.

Сучасні дослідження охоплюють широкий спектр методів синтезу шпінелі: твердофазне спікання, осадження, золь-гель технології, сублімаційне сушіння, гідротермальні процеси. Вони доповнюються введенням спеціальних добавок, спрямованих на ущільнення структури. Добре відомо, що використання високочистої сировини, утворення міцних прямих зв'язків MgO-MgO та MgO-шпінель і мінімізація низькоплавких силікатних фаз забезпечують отримання матеріалів з високою міцністю, покращеною стійкістю до клінкерної корозії та стабільністю розмірів за високих температур.

Важливим технологічним прийомом є застосування поліфракційного зернового складу шихти, що забезпечує щільніше пакування, підвищує щільність і знижує пористість готових виробів.

Кількість та тип шпінелі у складі шихти є визначальними для експлуатаційних властивостей вогнетривів. Згідно з [1–5], саме шпінельна фаза, а не периклаз, взаємодіє з клінкером з утворенням захисного шару.

При вмісті шпінелі понад 50 мас. % спостерігається швидке руйнування скелетної структури на межі «вогнетрив – клінкер».

Оптимальні показники стійкості та міцності виявлені за вмісту шпінелі 15–40 мас. %, а найкраще співвідношення властивостей – при 20–25 мас. %.

Патентні джерела [5, 6] підтверджують доцільність введення 5–30 мас. % шпінелі у високоякісних периклазошпінельних матеріалах.

Таким чином, контроль вмісту шпінелі є ключовим чинником для забезпечення оптимального балансу між міцністю, термостійкістю та корозійною стійкістю.

Традиційно у складі таких вогнетривів використовувалася алюмомагнезійальна шпінель. Проте останнім часом з'явилися нові напрями – застосування герцинітових та плеонастових шпінелей, що дало поштовх до створення периклазогерцинітових та периклазоплеонастових матеріалів.

Периклазогерцинітові вогнетриви на основі MgO та FeAl_2O_4 стали важливою тенденцією у розвитку безхромових матеріалів. Введення герциніту знижує модуль пружності, підвищує гнучкість та зменшує крихкість при термічних навантаженнях, а також покращує здатність до утворення захисного шару та стійкість до дії лугів і клінкерної корозії. Технологічно їх виробництво не відрізняється від виготовлення традиційних периклазошпінельних матеріалів.

Перспективним напрямком є поєднання різних типів шпінелей (алюмозалізистої, алюмотитанової, алюмомарганцевої та алюмомагнезійної), що дозволяє підвищити стійкість вогнетривів до комплексного впливу високотемпературних, механічних і корозійних факторів.

Аналіз літературних та патентних джерел свідчить, що перспективність розвитку периклазошпінельних вогнетривів визначається оптимізацією складу шихти, контролем вмісту шпінельної фази та застосуванням нових комбінацій шпінельних структур. Поєднання різних типів шпінелей у складі матеріалу відкриває нові можливості для підвищення довговічності та екологічної безпечності футерівки обертових цементних печей.

Література

1. Shubin V. I., Sakulin V. Y., Migal' V. P., Gershkovich S. I., Margishvili A. P., Bulin V. V. Choosing functional additives for optimizing the properties of periclase-spinel components. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2007. Vol. 48, No 1. P. 69–72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-007-0029-1>.
2. Lin X., Yan W., Ma S., Chen Q., Li N., Han B., Wei Y. Corrosion and adherence properties of cement clinker on porous periclase-spinel refractory aggregates with varying spinel content. *Ceramics International*. 2017. Vol. 43, No 6. P. 4984–4991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.00>.
3. Wu G., Yan W., Schafföner S., Lin X., Ma S., Zhai Y., Liu X., Xu L. Effect of magnesium aluminate spinel content of porous aggregates on cement clinker corrosion and adherence properties of lightweight periclase-spinel refractories. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 185. P. 102–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07>.
4. Шихта для изготовления алюможелезистой шпинели и огнеупоров с использованием алюможелезистой шпинели: пат. 105389 Российская Федерация. № 2013159119/03; заявл. 30.12.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. 10 с.
5. Magnesia spinel refractory brick: pat. 6,261,983 B1 United States. No 09/481,576; appl. 12.01.2000; publ. 17.07.2001. 10 p.
6. Шихта для виробництва периклазошпінельних вогнетривів: пат. 77591 Україна. № u201207748; заявл. 25.06.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. 5 с.

Бредіхіна В. Л., канд. юрид. наук, доц.

Науково-дослідний інститут правового забезпечення інноваційного розвитку НАПрН України, м. Харків, Україна

ДЕЯКІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ПРАВОВІ ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІОЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Питання забезпечення радіаційної безпеки, які набули надзвичайної актуальності після аварії на Чорнобильській АЕС, протягом багатьох років посідали чи не основне місце серед стратегічних напрямів формування та реалізації державної екологічної політики. Це знайшло своє віддзеркалення і у законодавстві незалежної України, зокрема, Законі України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» (1991 р.), який регулював питання поділу радіаційно забрудненої території на відповідні зони, встановлював режим їх використання та охорони, умови проживання та роботи населення, упорядковував господарську, науково-дослідну та іншу діяльність в цих зонах [1]. У 1995 р. був прийнятий Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», де було безпосередньо надано визначення радіаційної безпеки як дотримання допустимих меж радіаційного впливу на персонал, населення та навколишнє природне середовище, встановлених нормами та правилами з безпеки [2]. З прийняттям Конституції України у 1996 році держава закріпила за собою зобов'язання щодо забезпечення екологічної безпеки та подолання наслідків Чорнобильської катастрофи як катастрофи планетарного масштабу.

Згодом з розвитком законодавства радіаційна безпека стала розглядатися вже як частина техногенної та екологічної безпеки і змістовно поєднувати як сукупність технологічних показників, які характеризують стан захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного характеру, зокрема й від радіаційних та ядерних аварій, так і такий стан довкілля, при якому забезпечується попередження погіршення екологічної, в т.ч радіаційної, обстановки та виникнення небезпеки для життя й здоров'я людей. Таким чином сформувалося поняття радіоекологічної безпеки, що отримало своє розповсюдження і в сучасній науковій літературі.

Сьогодні в сучасних непростих умовах серед викликів та загроз національній безпеці, особливо на тлі повномасштабного вторгнення рф на територію України та

окупації місць розміщення атомних електростанцій (спочатку війни – промислового майданчика Чорнобильської АЕС, потім і донині – Запорізької АЕС), знову відмічається загроза небезпечного радіаційного впливу. Вона пов'язана із виникненням потенційних ризиків завдання радіаційної та іншої шкоди не тільки навколишньому природному середовищу, але і населенню нашої держави та інших країн. Як зазначається в нормативних документах, будь-які військові дії, диверсійні операції чи терористичні акти на об'єктах атомних електростанцій або застосування агресором на території України ядерної зброї можуть призвести до катастрофічних наслідків, зокрема до збільшення радіаційного забруднення довкілля та його транскордонного перенесення [3].

Тому вкрай актуальним з урахуванням всіх зазначених обставин є розуміння радіаційної обстановки, систематичне отримання об'єктивної, прозорої та достовірної інформації про радіаційний фон, безпековий стан АЕС, зокрема за допомогою моніторингових спостережень, обчислення рівня можливих ризиків для прийняття виважених управлінських рішень. На думку фахівців, в умовах російсько-української війни це вбачається також важливим з огляду на необхідність підвищення ефективності кризових екологічних комунікацій між урядом України та її населенням, міжнародними організаціями (напр., МАГАТЕ), Європейським Союзом та урядовими структурами інших країн [4, с. 65].

В рамках євроінтеграційного реформування організаційно-правової бази охорони довкілля в Україні передбачено оновлення та модернізація моніторингу навколишнього природного середовища, зокрема, шляхом започаткування комплексної цифрової системи моніторингу довкілля для прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій та прийняття управлінських рішень у даній царині. Метою цієї реформи є отримання достовірних і співставних даних та інформації про стан довкілля для оперативного реагування та запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру, а також забезпечення вільного доступу до екологічної інформації громадськості та впровадження її обміну і взаємодії з системами держав-членів ЄС. Однією із підсистем державної системи моніторингу довкілля вважається моніторинг впливу фізичних факторів, в тому числі й іонізуючого випромінювання [5]. В законодавстві та літературі він отримав назву радіаційний або радіоекологічний моніторинг, основним завданням якого є здійснення радіометричного контролю об'єктів навколишнього середовища, збирання методами дозиметрії іонізуючого випромінювання первинної інформації про вміст радіонуклідів у повітрі, воді, продуктах

харчування і т. ін. з подальшою обробкою отриманих даних для оцінки і прогнозу радіоекологічної ситуації [6, с. 7].

Варто зазначити, що донедавна в нашій країні була відсутня інтегрована автоматизована система моніторингу для виявлення, аналізу та прогнозування можливих наслідків радіаційних аварій, викиди внаслідок яких можуть розповсюджуватися за межі санітарно-захисних зон атомних електростанцій, інших ядерних установок та радіаційно небезпечних об'єктів в Україні та за її межами. Також бракувало й єдиної системи підготовки прийняття управлінських рішень, яка б давала можливість проводити оцінку наслідків таких аварій. Втім, Україна, як член МАГАТЕ, намагається виконувати свої зобов'язання навіть під час дії воєнного стану та за можливості надає результати радіоекологічних вимірювань до міжнародної системи радіаційного моніторингу МАГАТЕ в міжнародному форматі обміну радіологічними даними та забезпечення участі постачальників даних у програмах контролю якості вимірювань.

Тому розроблення стратегії інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу було визначено ще до повномасштабної війни як одне із стратегічних завдань подолання викликів та загроз національній безпеці України і поставлено в ряд першочергових заходів в екологічній сфері рішенням РНБО України від 23 березня 2021 р. [7]. У зв'язку з виникненням потреби в отриманні оперативної інформації про концентрацію та динаміку міграції радіонуклідів, оцінювання ступеню можливого радіаційного забруднення довкілля та його транскордонного перенесення для прийняття відповідних рішень щодо забезпечення радіаційної безпеки Кабінетом Міністрів України була схвалена Стратегія інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року [3]. Метою створення даної системи було об'єднання та систематизація даних, отриманих з об'єктових автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки та пунктів державної системи гідрометеорологічних спостережень Державної служби України з надзвичайних ситуацій, їх обробки та аналізу в єдиному міжнародному форматі обміну даними. Вбачалося, що інтегрована система завдяки використанню, зокрема, й цифрових технологій, буде ефективно функціонувати як в повсякденному режимі, так і в умовах аварійних, надзвичайних ситуацій. Вбачається, що її створення має забезпечити узагальнення результатів спостережень радіаційної обстановки в єдиній системі автоматизованого збору, обробку, передачу та аналіз даних про радіаційну обстановку на території України та в частині транскордонного перенесення радіонуклідів, а

система підготовки прийняття рішень в її складі дасть змогу оперативно отримувати результати прогнозу наслідків надзвичайних ситуацій.

Проте, за даними звіту Міндовкілля України про стан реалізації прийнятої Стратегії до 2024 р. виявилось, що деякі підприємства, які перебувають у сфері управління Міненерго України та на яких повинні виконуватися роботи з моніторингу радіаційного стану їх територій та об'єктів, не мають об'єктових автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки. Більш того, вони не мають і фінансових ресурсів для забезпечення модернізації наявних у них засобів радіаційного контролю та створення автоматизованих систем збору, обробки та передачі даних у режимі реального часу до інтегрованої системи радіаційного моніторингу. Відповідно до вказаного звіту, створення такої системи в Україні потребує залучення міжнародної технічної та фінансової допомоги [8]. Безперечно, впровадження заходів, передбачених Стратегією, ще й ускладнюють ворожі ракетні та інші обстріли, через які наразі пошкоджені в багатьох місцях датчики радіаційного моніторингу, тому виникають серйозні труднощі із проведення аналізу/оцінки об'єктових автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки. Крім того, у разі її погіршення або витоку радіації наразі неможливе вчасне реагування та прийняття управлінських рішень на тимчасово окупованих територіях, зокрема, на території Запорізької АЕС.

Зважаючи на викладене, зазначимо, що модернізація системи забезпечення радіоекологічної безпеки, зокрема радіаційного контролю та моніторингу, приведення їх у відповідність до сучасних стандартів, синхронізація з європейською радіологічною системою сьогодні є вкрай нагальною задачею, яка потребує не тільки законодавчої уваги, а й ефективних комплексних механізмів їх впровадження та фінансування.

Література

1. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи: Закон України від 27.02.1991 № 791а-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791%D0%B0-12#Text> . (дата звернення 04.09.2025).
2. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 08.02.1995 № 39/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 04.09.2025).

3. Про схвалення Стратегії інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2022 р. № 323-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/323-2022-%D1%80#Text> (дата звернення 04.09.2025).
4. Мирошніченко А., Горошко О. Кризові екологічні комунікації у період воєнного часу (на прикладі Запорізької АЕС). *Грані*. 2024. Том 27. № 6. С. 60-70. DOI: <https://doi.org/10.15421/1724113>.
5. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля: Закон України від 20.03.2023 № 2973-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text> (дата звернення 04.09.2025).
6. Герасимов О.І., Андріанова І.С. Радіаційний моніторинг: конспект лекцій. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2018. 69 с. URL: eprints.library.odku.edu.ua.
7. Про виклики і загрози національній безпеці України в екологічній сфері та першочергові заходи щодо їх нейтралізації: Рішення РНБО України від 23 березня 2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0018525-21#Text> (дата звернення 04.09.2025).
8. Звіт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України про стан реалізації Стратегії інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/strategiya-integrovanoyi-avtomatyzovanoyi-systemy-radiatsijnogo-monitoringu/> (дата звернення 04.09.2025).

Булавина Д. А., магістрант;

Гожа М. М., аспірант;

Саввова О. В., д-р. техн. наук;

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна

СКЛОКЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ ЯК ЕФЕКТИВНІ МАТРИЦІ ДЛЯ ІММОБІЛІЗАЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Вступ

Сучасний розвиток атомної енергетики, промисловості, медицини та наукових досліджень супроводжується постійним зростанням обсягів радіоактивних відходів (РАВ), серед яких найбільшу загрозу становлять високоактивні радіоактивні відходи (ВАРВ), що є одними з найбільш небезпечних техногенних забруднювачів довкілля. Їх небезпечність визначається високим рівнем радіоактивності та тривалими періодами напіврозпаду ізотопів. Тому перед науковцями та інженерами стоїть складне завдання – створення матеріалів, здатних гарантувати довготривалу ізоляцію радіонуклідів протягом геологічних масштабів час. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання склокерамічних матеріалів (СКМ), які поєднують технологічні переваги скла та стабільність кераміки. Завдяки наявності одночасно скляної й кристалічної фаз, ці матеріали відзначаються високою хімічною інертністю, низькою швидкістю вилугування та підвищеною стійкістю до дії іонізуючого випромінювання, що робить їх придатними для довготривалої іммобілізації ВАРВ. Важливою перевагою є також адаптивність складу: шляхом зміни умов термообробки можна регулювати кількість і тип кристалічних фаз.

Аналітичний огляд

Для утилізації РАВ сьогодні застосовують кілька базових технологічних підходів: цементацію, бітумізацію, вітрифікацію та використання склокристалічних матриць.

Цементація є однією з найпростіших і найдешевших технологій, проте цементні матриці мають обмежену термостійкість та недостатню довговічність під дією іонізуючого випромінювання [1]. Бітумізація забезпечує високу водонепроникність, однак цей матеріал нестабільний при підвищених температурах і схильний до радіолізу [2]. Вітрифікація, яка активно використовується у багатьох країнах світу, дозволяє перетворювати РАВ у аморфну склоподібну матрицю, що ефективно

утримує широкий спектр ізотопів [3]. Однак цей метод є енергоємним та потребує застосування високотемпературних процесів.

Склокерамічні матеріали поєднують технологічну простоту вітрифікації та стійкість керамічних матеріалів, завдяки чому їх вважають одним з найбільш перспективних рішень для іммобілізації ВАРВ. Матеріали мають дуже низький коефіцієнт вилуговування радіонуклідів – не більше 10^{-6} г/см²·добу, що відповідає вимогам довготривалого збереження. Склокерамічні матеріали також мають здатність зберігати стабільність при нагріванні за високих температур і під впливом радіаційного опромінення інтенсивністю до 10^8 рад. Склокерамічні матеріали можна поділити на декілька основних груп, а саме:

- боросилікатні скла та ситали, які широко використовуються у вітрифікації ВАРВ у Франції та США;
- фосфатні СКМ, що добре утримують актиноїди й рідкісноземельні елементи;
- склокерамічні композити на основі LnUO_4 ;
- матеріали з фазами апатиту, пірохлору, голандиту, які забезпечують селективне включення окремих ізотопів
- гранітоподібні склокристалічні матеріали, склад яких близький до природних геологічних середовищ і які відзначаються високою геохімічною сумісністю.

Така класифікація демонструє гнучкість СКМ та можливість їх підбору залежно від складу відходів.

Починаючи з середини ХХ століття, було сформовано три ключові підходи до отримання універсальних склокристалічних матеріалів – ситалів, що відрізняються за видом вихідної сировини. Перший із них полягає у виготовленні технічних ситалів із ретельно підібраних та дозованих сумішей чистих оксидів. До цієї групи належать пірокераміки та фотоситали, серед яких поширені сподуменові й кордієритові СКМ [4].

Серед матеріалів із подібними властивостями особливе місце займає склокераміка на основі гірських порід, зокрема, отримана з гранітного техногенного відходу. Особливий інтерес викликають гранітоподібні склокристалічні матеріали, хімічний і мінералогічний склад яких наближений до природних гірських порід. Для них характерна стабільна теплостійкість: процес ущільнення розпочинається приблизно при температурі (Т) 97 °С, а максимальна щільність формується за температури близько $T=1100$ °С. У проміжку $T=1000\text{--}1350$ °С [5] спостерігається поступова трансформація мікроструктури без руйнування фазової будови, що підтверджує її стійкість до впливу високих температур. Така геохімічна сумісність підвищує

прогнозованість поведінки матеріалу при тривалому захороненні. Граніт має дуже низьку газову проникність до 10^{-20} м^2 [6], що свідчить про щільність структури та здатність обмежувати транспортування газових форм радіонуклідів. Розплави на основі базальтів демонструють високу плинність при температурах до 1500°C [7], що спрощує процес формування виробів. Застосування гранітних відходів та базальтової сировини як основних компонентів дає можливість знизити собівартість виробництва та водночас вирішити проблему утилізації промислових відходів.

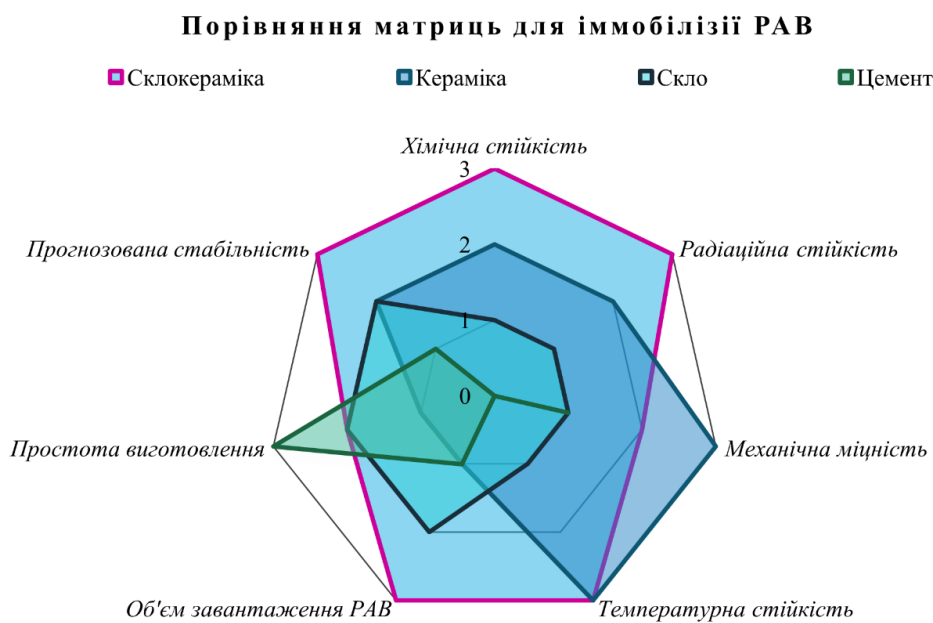


Рисунок 1 – Пелюсткова діаграма характеристик певних типів матриць для іммобілізації РАВ: склокераміка, кераміка, скло, цемент

Гранітна СКМ зазвичай має міцність на стиск – $110\text{--}235 \text{ МПа}$, на згин – до $112,5 \text{ МПа}$ й щільність $2,33 \text{ г/см}^3$ [8]. Високі показники термічної та радіаційної стабільності дозволяють розглядати СКМ як надійний матеріал для створення довговічних бар'єрів та тривалого захоронення ВАРВ. Введення у структуру матеріалу діопсид-апатитових фаз забезпечує підвищення його механічної міцності приблизно на чверть, а використання гранітного шламу дає змогу знизити температуру спікання до 1150°C , що робить процес енергетично вигіднішим. (рис. 1)

Перспективи розвитку полягають у вдосконаленні технологій кам'яного лиття та створенні петроситалів на основі базальтової і гранітної сировини [9-12]. Такі матеріали відзначаються підвищеною довговічністю та механічною міцністю, що

відкриває можливість їх промислового застосування у масштабних багатобар'єрних системах геологічного зберігання.

Висновки

СКМ є одним із найефективніших матеріалів для іммобілізації ВАРВ. Їхні основні властивості – висока хімічна інертність, термічна стабільність, стійкість до опромінення, низький коефіцієнт вилугування та можливість включення до 45 % мас. РАВ – забезпечують високу надійність при довготривалому зберіганні. Використання природної мінеральної сировини, таких як гранітні і базальтові матеріалів, підвищує економічну ефективність технології й водночас сприяє вирішенню проблеми утилізації промислових відходів. Подальший розвиток технологій синтезу СКМ відкриває широкі перспективи для їх масштабного промислового використання .

Література

1. Cement-based solidification of nuclear waste: Mechanisms, formulations and regulatory considerations / S. Barbhuiya et al. Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 356. 120712. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120712> (date of access: 05.09.2025).
2. Radiolysis of bituminized radioactive waste: a comprehensive review / L. Millot et al. EPJ Nuclear Sciences & Technologies. 2024. Vol. 10. no. 4. URL: <https://doi.org/10.1051/epjn/2024004> (date of access: 05.09.2025).
3. Sakai A., Ishida S. Reflective reviews on Japanese high-level waste (HLW) vitrification – Exploring the obstacles encountered in active tests at Rokkasho. Annals of Nuclear Energy. 2023. Vol. 196. 110175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110175> (date of access: 05.09.2025).
4. 43. Високоміцні склокомпозиційні матеріали спеціального призначення : бронестійкі ситали : навч. посібник / О. В. Саввова, Г. К. Воронов, О. І. Фесенко, Ю. О. Смирнова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 162 с.
5. Characterization and thermal behavior of granite waste during heating / B. Qiu et al. Ceramics International. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.066>
6. Progress on rock mechanics research of Beishan granite for geological disposal of high-level radioactive waste in China / L. Chen et al. Rock Mechanics Bulletin. 2023. 100046. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2023.100046> (date of access: 05.09.2025).

7. Lima L. F. de, Zorzi J. E., Cruz R. C. D. Basaltic glass-ceramic: A short review // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. – 2020. – Vol. 61, No. 1. – P. 2–12. – URL: <https://surl.li/znjqyk> (date of access: 05.09.2025).
8. Study of melting properties of basalt based on their mineral components / X. Chen et al. Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 116. P. 53–60. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.014> (date of access: 05.09.2025).
9. Pilania R. K., Dube C. L. Matrices for radioactive waste immobilization: a review. Frontiers in Materials. 2023. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1236470> (date of access: 05.09.2025).
10. A natural granite based glass-ceramics matrix for immobilizing simulated An³⁺ waste / Y. He et al. Journal of Non-Crystalline Solids. 2023. Vol. 600. 122039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.122039> (date of access: 05.09.2025).
11. Liu C., Zhou J., Lu J. Sinterability, structural evolution and pinhole elimination of high strength self-glazed glass-ceramics sintered from granite sludge by instant glaze firing. Materials Technology Reports. 2025. Vol. 3, no. 1. P. 2851. URL: <https://surl.li/nladoo> (date of access: 05.09.2025).
12. Technical, Environmental, and Cost Assessment of Granite Sludge Valorisation / E. Surra et al. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 7. 4513. URL: <https://doi.org/10.3390/app13074513> (date of access: 09.05.2025).

Васенко О. Г., канд. біол. наук, доц.;

Ієвлева О. Ю., наук. співр.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ КОМПЛЕКСНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ УКРАЇНСЬКОЇ ЧАСТИНИ ДЕЛЬТИ ДУНАЮ У ПЕРШОМУ ПІВРІЧчі 2025 РОКУ

З метою оцінки впливу робіт на екологічний стан дельти Дунаю під час експлуатації глибоководного суднового ходу (ГСХ) р. Дунай - Чорне море програмою моніторингу у 2025 р. були передбачені такі основні види робіт:

- проведення регулярного гідрологічного та гідрохімічного моніторингу на пунктах фонових спостережень, в районі виконання гідротехнічних робіт та в зоні можливого впливу ГСХ Дунай-Чорне море на навколишнє природне середовище;
- проведення контрольних вимірів якості води та донних відкладів при проведенні днопоглиблювальних робіт на морському підхідному каналі ГСХ та у районі морського відвалу ґрунту;
- оцінка кумулятивних впливів судноплавства на стан наземних та водних екосистем;
- проведення комплексних експедиційних обстежень якості вод та стану компонентів навколишнього природного середовища. Комплексні експедиційні обстеження включають гідрологічні, гідрохімічні та гідробіологічні дослідження морської частини ГСХ, а також прибережних екосистем на території Дунайського біосферного заповідника;
- моніторинг стану іхтіофауни, оцінка негативного впливу на рибні ресурси при експлуатації суднового ходу Дунай-Чорне море;
- моніторинг рослинних та тваринних угруповань берегової лінії та плавнів Дунайського біосферного заповідника при експлуатації ГСХ Дунай-Чорне море;
- розроблення рекомендацій щодо попередження та мінімізації впливів експлуатації ГСХ на навколишнє природне середовище, у т. ч. у транскордонному контексті.

До виконання робіт головним виконавцем (УКРНДІЕП Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України) були залучені наступні організації: Дунайська гідрометеообсерваторія (ДГМО), філія «ЧорноморНДІпроект» ДП «АМПУ», Дунайський біосферний заповідник НАНУ (ДБЗ), Державна установа «Інститут морської біології» (ІМБ) НАНУ, Інститут гідробіології Національної академії наук України (ІГБ).

За даними ДГМО у першому півріччі на український ділянці Дунаю середні місячні рівні води були нижчими за середні багаторічні значення на 50-174 см над «0» поста Рені. За цей період відмічалось декілька незначних паводкових хвиль. Максимальний рівень відмічався у квітні і склав 330 см, при цьому, середній багаторічний рівень води весняного водопілля складає 410 см.

У першому півріччі водність Дунаю була дуже мала. Модульний коефіцієнт стоку дорівнював 0,66. В Чорне море за цей період поступило з Дунаю 78,8 куб.км води, що відповідає середній витраті 5040 куб. м/с.

У зв'язку з малою водністю Дунаю посилюється проникнення клину морської води у гирло Бистре, що може викликати суттєві зміни екологічного стану усєї ділянки дельти. Зокрема, відмирання організмів бентосу та зміни видового складу гідробіонтів.

Стік завислих наносів Дунаю за звітний період склав 3,64 млн. тон, з яких 0,69 млн. тон, або 18,9% від загальної кількості пройшло по рукаву Бистрому.

Дунайська вода була добре насичена киснем, але у порівнянні з концентрацією кисню за багаторічний період відмічалось його збільшення. Концентрація вуглекислого газу у дунайській воді у порівнянні з багаторічними величинами зменшилась.

Гідрохімічний режим р. Дунай залежав, в основному, від змін гідрологічних факторів: водності, температури води та кількості завислих речовин. Значні швидкості течії та турбулентність потоку сприяли однорідності хімічних показників та їх відносно обмеженої амплітуди.

У дунайській воді концентрація органічних речовин, що окислюються біхроматом калію, переважали у 4,3 рази концентрацію речовин, що окислюються перманганатом калію. У звітному періоді відмічалось зменшення органічних речовин у дунайській воді на відміну БСК₅, величина якого збільшилась у порівнянні з минулими роками [1].

Із біогенних елементів спостереження велися за концентраціями азоту, фосфору та кремнію. Концентрації амонійного азоту знаходились на рівні багаторічних значень, нітратного азоту зменшилась, азоту нітритного збільшилась. У відібраних

пробах було зафіксоване досягнення та перевищення ГДК для азоту нітритного у 4,25 та 50 % в січні, квітні та червні відповідно. Концентрація кремнію знаходилась на рівні багаторічних концентрацій.

Концентрація шестивалентного хрому коливалась у межах від 1 до 9 ГДК. Середня концентрація склала 0,005 мг/дм³ (5 ГДК) та була більшою від багаторічної на 0,001 мг/дм³. У 100 % відібраних проб концентрація хрому шестивалентного досягала та перевищувала значення ГДК.

Результати вмісту металів в донних відкладах, які відібрані під час експедиційних досліджень УКРНДІЕП в квітні 2025 року подібні до отриманих у попередні роки:

Вміст *валового заліза* в донних відкладах на досліджуваних пунктах знаходився в межах від 15000 мг/кг сухоповітряної маси до 23000 мг/кг сухоповітряної маси. Максимальний вміст зафіксовано в пунктах спостереження R10 (Рук. Кілійський, 21 км, 1 км нижче м. Вилкове), R12 (Рук. Старостамбульський, 14) . Середнє значення для цього показника становило 20500 мг/кг сухоповітряної маси.

Вміст *валового марганцю* у середньому становив 672,5 мг/кг сухоповітряної маси. Найбільші концентрації були в пункті спостереження R 01 (р. Дунай, 71 миля, 1 км вище м. Рені), які склали 872 мг/кг сухоповітряної маси.

Вміст *валового цинку* на досліджуваній ділянці коливався від 51 мг/кг сухоповітряної маси у пункті R06 (Рук. Кілійський, 89 км, 1 км нижче м. Ізмаїл) до 90 мг/кг сухоповітряної маси у пункті R12 (Рук. Старостамбульський, 14). Середнє значення – 78 мг/кг сухоповітряної маси.

Вміст *валової міді* на досліджуваній ділянці мав найбільше значення 43 мг/кг сухоповітряної у пункті R 01 (р. Дунай, 71 миля, 1 км вище м. Рені). Середнє значення – 34,3 мг/кг сухоповітряної маси.

Вміст валового нікелю знаходиться в межах від 26 мг/кг сухоповітряної маси до 39 мг/кг сухоповітряної маси. Максимальний вміст зафіксовано в пунктах спостереження R10 (Рук. Кілійський, 21 км, 1 км нижче м. Вилкове), R12 (Рук. Старостамбульський, 14). Середнє значення для цього показника становить 34,75 мг/кг сухоповітряної маси.

Дослідження стану гідробіологічних угруповань української частини дельти Дунаю у весняний період 2025 р. показали наявність 63 видів планктонних водоростей, з домінуванням діатомових (76 %). Видове багатство на окремих ділянках змінювалось в межах 17-23 видів, чисельність – 2,44–4,27 млн. кл/дм³, біомаса – 2,20–11,82 мг/дм³.

Індекси сапробності за Пантле-Букк, коливалися в межах 1,53–1,81, що відповідає β -мезосапробній зоні. Індекси видового різноманіття Шеннона за чисельністю фітопланктону варіювали 2,81–3,91 біт/екз, за біомасою – 2,09–3,90 біт/мг, що свідчить про полідомінантний характер планктонних угруповань. За трофо-сапробіологічними критеріями біомаса фітопланктону досліджених ділянок відповідала ев-політрофним водам, переважно III-IV класам якості вод.

У квітні 2025 р. серед 9 проб води у одній була виявлена хронічна токсичність. Одну пробу води (1 км нижче м. Ізмаїл) віднесено до 2 класу якості. За результатами біотестування 8 проб води за ступенем забрудненості віднесено до I класу якості – вода чиста (р. Дунай вище м. Рені 2 км; 1 км вище м. Вилкове, р. Старостамбульський 11 км, 14 км, 17 км; Соломонов рукав, р. Очаківський 10 км, 17 км) [2].

За даними ІМБ екологічний статус клас у I кварталі 2025 року для регіону авандельти Дунаю, за причин низького рівня водності цього періоду – 27.11% від середнього багаторічного стоку Дунаю, відповідав категорії – «Високий» («High»).

Екологічний статус клас у II кварталі 2025 року для регіону авандельти Дунаю відповідав категорії – «Добрий» («Good»), за причин низького рівня водності цього періоду яка склала – 35.25% від середнього багаторічного стоку Дунаю [1,3,4].

Днопоглиблення і складування ґрунтів яке забезпечує паспортні характеристики морського підхідного каналу ГСХ, в першу чергу, мали вплив на кормову базу риб, і в меншій мірі на умови відтворення та ранню молодь іхтіофауни. Проте дослідження, що проводяться в рамках екологічного моніторингу ділянок днопоглиблювальних робіт на ГСХ, свідчать про те, що ця дія в основному обмежена локальними ділянками. Днопоглиблювальні роботи викликають короткострокове підвищення концентрацій зважених речовин у воді.

За даними ДБЗ на острові Єрмакові на картах наміву продовжує спостерігатись погіршення стану маслинок і тамариску, якими вони заростали. Проективне покриття рослинності зменшується і на мулистих, і на піщаних ділянках. Причиною скоріше за все є кліматичні екстремальні умови та вплив випасу.

Мулисті карти наміву через заростання їх маслинками, обліпихою та іншими деревами, завдяки непрохідним для тварин хащам частково зберігають видове різноманіття. Піщані карти наміву дуже важко заростають, там переважають види-ефемери. При проектуванні та утворенні карт наміву, необхідно спочатку складувати піщані ґрунти, а потім покривати їх мулом.

В нерестовий період рівень води в Дунаї був низький, а в травні- червні взагалі найнижчий за останні 6 років. Середня температура води в квітні, коли вже починається нерест багатьох масових видів риб, була в 2025 році на 3.1 C⁰ нижче ніж у 2024 році. Ці негативні фактори привели до того, що дружнього масового нересту основних промислових риб в травні не відбулось [1].

Стосовно рідкісних видів риб, то найбільш визначним фактом стала фіксація різкого збільшення прилову осетрових в промислові знаряддя лову та їх значний вилов і в науково-дослідницькі знаряддя лову. В першу чергу це пов'язано як із-за вже трьохрічної відсутності промислу в Чорному морі, із-за обмежень військового стану, так із-за зменшення інтенсивності лову в р. Дунай. Важливим є постійна наявність в уловах зникаючого російського осетра. Серед інших рідкісних видів риб постійно відмічались такі ендеміки Дунаю як полосатий йорж та малий чоп, а також рідкісна чехоня.

За даними ДБЗ основні фенологічні періоди в житті амфібій та рептилій у першій половині 2025 р. змістилися на більш пізні терміни, в порівнянні з попередніми роками, проте залишилися в межах середніх багаторічних показників.

Видовий склад та розподіл представників герпето- та батрахофауни в районі ГСХ Дунай-Чорне море у 2025 р. не змінилися. Суттєвих змін в місцях концентрації та розмноження амфібій та рептилій, спричинених інтенсифікацією судноплавства по гирлу Бистре не встановлено.

Видовий склад орнітофауни ДБЗ залишається стабільним. У Дунайському біосферному заповіднику зареєстровано 301 вид птахів, без змін у видовому складі порівняно з попередніми роками. Це свідчить про збереження біорізноманіття території.

Воєнні дії російської федерації створюють найбільш критичну загрозу для орнітофауни. Атаки під час весняного гніздування призвели до шумового забруднення, руйнування біотопів, забруднення токсинами, що має руйнівний вплив на гніздування та чисельність птахів, перевищуючи за значущістю інші антропогенні фактори.

Прямий моніторинг птахів обмежений воєнним станом, тому активно застосовуються методи дистанційного зондування. Через закриття частини територій для польових робіт дослідження проводяться за допомогою супутникових знімків Sentinel-2 L2A, що дозволяє контролювати зміни біотопів та стан гніздових територій навіть за умов обмеженого доступу.

Під час проведення досліджень істотного прямого впливу ГСХ Дунай –Чорне море на теріофауну ДБЗ виявлено не було [5].

Для виконання робіт з аналізу динаміки руслових процесів і завислих речовин в дельті Дунаю та прибережній частині Чорного моря за матеріалами космічних зйомок були залучені знімки з космічного апарату Landsat 8. Вибір знімків КА Landsat обумовлений їх доступністю та можливістю використання всього набору спектральних каналів як для надійної візуальної ідентифікації водних об'єктів, так і для автоматичної обробки спеціалізованим програмним забезпеченням (для ідентифікації водних поверхонь найбільш ефективною є комбінація інфрачервоних (далекого, середнього та ближнього) та червоного каналів, а для оцінки кількості завислих речовин використовуються червоний і блакитний канали). Також знімки КА Landsat мають оптимальне просторове розрізнення, що забезпечує необхідну детальність досліджень.

У зоні дампіngu аномалій фототону не спостерігалось. Аналіз космічних знімків за першу половину 2025 року показав наявність змін в дельтоутворенні р. Дунай за рахунок процесів акумуляції та розмиву [1].

Найбільший винос зважених речовин відбувався під час весняних паводків та проходження циклонів. Саме в цей час акваторія вкрита хмарами, тому космічні знімки не в повній мірі репрезентують напрямки виносу зважених речовин у Чорне море внаслідок неможливості спостереження.

Складування ґрунтів здійснювалося на морський підводний відвал у ПЗЧМ методом вільного скидання. Аналіз результатів натурних спостережень, виконаних на акваторіях днопоглиблення і складування ґрунтів в останні роки, показав, що по своїм фізико-механічним характеристикам ґрунти подаються у відвал близькі до техногенних донних відкладень акваторії відвалу.

Аналіз морфологічних умов ділянки морського відвалу та обсягів складованих ґрунтів днопоглиблення свідчить про доцільність використовуваної технології утилізації ґрунтів – збереження їх в межах запроектованої ділянки акваторії морського підводного відвала та не розповсюдження ґрунтів за її межами. Це дозволяє зробити висновок про відсутність трансграничного впливу робіт по складуванню ґрунтів на прилеглі акваторії ПЗЧМ [5].

За результатами робіт не виявлено суттєвих впливів експлуатації ГСХ «Дунай – Чорне море» та робіт з підтримки паспортних характеристик морського підхідного

каналу на українську частину дельти Дунаю, а також транскордонного впливу морського відвалу ґрунтів, розробки та складування ґрунту.

Література

1. Анотований зведений звіт за I півріччя 2025 р. з науковим обґрунтуванням подальшої експлуатації підводного морського відвалу, визначення остаточної ґрунтомісткості морського підводного відвалу / НДУ УКРНДІЕП. – Харків, 2025. – 185 с.
2. Методика визначення рівнів токсичності поверхневих і зворотних вод для контролю відповідності їх якості встановленим нормативним вимогам. / Мінекобезпеки України. - Київ, 2000.
3. DIRECTIVE 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy. 23 October 2000. (WFD. 2000/60/EC).
4. DIRECTIVE 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of marine environmental policy. 17 June 2008. (MSFD. 2008/56/EC).
5. Анотований звіт про науково-дослідну роботу «Комплексний екологічний моніторинг довкілля під час експлуатації глибоководного суднового ходу р. Дунай – Чорне море у 2025-2026 роках. Район Морського підхідного каналу» 1 етап / НДУ УКРНДІЕП. – Харків, 2025. – 118 с.

Васенко О. Г., канд. біол. наук,
Старко М. В.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ЗАГАЛЬНА ЕКОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВ'ЯНСЬКОЇ ВОДОЙМИ, ДЕ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ ВИДОБУТОК ПІСКУ

Вступ

Внаслідок кар'єрних розробок з видобутку піску та будівельних матеріалів у Харкові утворилася велика кількість кар'єрних водойм, у тому числі Основ'янське озеро [1]. Озеро знаходиться у південно-західній частині Харкова, між Гутами, Жихорем та Основою. Сто років тому тут було невелике озеро, але після того, як поряд з ним почали добувати пісок, його площа зросла [2].

Водойми, що знаходяться в межах великих міст, мають важливе значення для місцевих мешканців, на їх берегах часто можна зустріти рибалок-любителів та відпочивальників, як наприклад Озеро Котлован, яке є штучно створеною водоймою, що виникла при забудові лівобережжя м. Дніпро [3].

Кількість кар'єрів у містах може досягати значної кількості. Так, у Львові налічують 74 кар'єрні виїмки на площі 191,1 га [4]. У Харкові - 17 кар'єрних водойм [1].

Незважаючи на велику кількість кар'єрів, до цього часу відзначається мала вивченість особливостей функціонування їх екосистем у міському середовищі [4].

Дане повідомлення присвячено окремим екологічним характеристикам Основ'янської водойми за результатами аналізу проб, які були відібрані у липні 2025 року.

Методика досліджень. Проби відбиралися та оброблялися загальноприйнятими у гідрохімії та гідробіології методами.

Результати досліджень.

1. Гідрохімічний стан. Хімічний аналіз води Основ'янській водоймі за основними показниками відповідає рибогосподарським нормативам якості води (табл.1).

Крім того, за даними Регіонального офісу водних ресурсів у Харківській області. вода Основ'янської водойми відповідає нормативу токсичності - відсутність гострої летальної токсичності згідно з «Методикою визначення рівнів токсичності поверхневих

і зворотних вод для контролю відповідності їх якості встановленим нормативним вимогам. Такі води відносяться до 1 класу якості «чисті» [5]

Таблиця 1 – Сучасний гідрохімічний стан Основ'янської водойми

Показники, одиниці виміру	Дані	Рибогосподарські стандарти	
		[5]	[5]
pH, одиниць	8,13	-	6,0-8,5
Сухий залишок, мг/дм ³	621,0	-	До 1000
Прозорість (за диском Секі), м	1,25	-	-
Зважені речовини, мг/дм ³	15,0	25,0	До 25,0
Розчинений кисень	9,03	-	6,0-8,0
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	6,0	-	5,0-7,0
Азот амонійний, мгN/мг/дм ³	0,03	0,5-1,0	до 2,0
Нітрати, мгN/дм ³	0,32	-	до 2,0
Нітрити, мгN/дм ³	0,001	-	до 0,1
Ортофосфати, мгP/дм ³	0,51	07	до 0,7

2. Характеристика основних груп гідробіонтів

Незважаючи на функціонування Основ'янської водойми з 1930-х років, даних щодо її екологічного стану в публікаціях виявлено не було. Більшість представлених у цьому звіті даних носять піонерний характер.

Фітопланктон. Під час обстежень було виявлено 42 видових та внутрішньовидових таксонів з 7 відділів прісноводного фітопланктону. За чисельністю та біомасою переважали синьозелені та динофітові водорості. Загальний розвиток фітопланктону складав за чисельністю 21,82 млн. кл/л, за біомасою - 2,28 мг/л (табл. 2).

Таблиця 2 – Кількість видів (n, одиниць), чисельність (Ч, млн. кл/л), біомаса (Б, мг/л) фітопланктону та індекс сапробності.

№ з/п	Таксони	N	Ч	Б
1	<i>Cyanophyta</i> - Синьозелені	8	20,22	0,74
2	<i>Dinophyta</i> - Динофітові	3	0,019	0,554
3	<i>Cryptophyta</i> - КRYPTOфітові	2	0,027	0,025
4	<i>Chrysophyta</i> - Золотисті	2	0,36	0,045
5	<i>Bacillariophyta</i> - Діатомові	7	0,334	0,075
6	<i>Euglenophyta</i> - Евгленові	7	0,09	0,46
7	<i>Chlorophyta</i> - Зелені	9	0,765	0,38
РАЗОМ		38	21,82	2,28

Вищі водяні рослини. Береги озера заросли угрупованнями очерета звичайного *Phragmites australis*, а також рогозами широколистим *Typha latifolia*, та вузьколистим *T. angustifolia*, декількома видами осок *Salix* sp. У самій водоймі були знайдені занурені рослини кушир темно-зелений *Ceratophyllum demersum*, рдести стеблооб'ємний *Potamogeton perfoliatus* та гребінчастий *Stuckenia pectinata*. Занурені рослини вкрити нитчастими водоростями. Велика прозорість води (1,25м за диском Секі) свідчить про задовільні умови для розвитку вищих водяних рослин у цій водоймі.

Зоопланктон. У складі зоопланктонного співтовариства було виявлено 21 таксон 3-х систематичних груп: *Rotatoria*, *Cladocera* та *Copepoda*. *Rotatoria* були представлені 13 видами. За чисельністю та біомасою переважала *Asplanchna priodonta*. З *Copepoda* знайдено 4 таксони. По біомасі переважав *Cyclops vicinus*. *Cladocera* визначено 4 таксони. Найбільшу біомасу складала *Daphnia cucullata*. Загальна чисельність зоопланктону Основ'янської водойми у липні 2025 року була 64,4 тис. екз/м³, біомаса – 1150,18 мг/м³ (табл. 3).

Таблиця 3 – Видовий склад, чисельність і біомаса зоопланктону Основ'янської водойми

№ п/п	Таксони	Ч	Б
<i>Rotatoria</i>			
1	<i>Asplanchna priodonta</i>	11,9	238,0
2	<i>Brachionus calyciflorus calyciflorus</i>	1,5	6,0
3	<i>Brachionus diversicornis diversicornis</i>	1,7	8,5
4	<i>Brachionus angularis</i>	1,7	0,73
5	<i>Brachionus calyciflorus spinosus</i>	0,6	3,0
6	<i>Brachionus diversicornis homoceros</i>	0,8	4,0
7	<i>Brachionus diversicornis homoceros</i>	0,8	4,0
8	<i>Keratella cochlearis</i>	2,8	0,6
9	<i>Keratella cochlearis tecta</i>	1,3	0,3
10	<i>Polyarthra vulgaris</i>	1,0	0,6
11	<i>Trichocerca pusilla</i>	1,2	0,15
12	<i>Trichocerca longiseta</i>	1,2	0,5
13	<i>Filinia longiseta</i>	1,4	0,30
	Всього	27,9	266,68

Copepoda

1	<i>Acanthocyclops viridis</i>	8,1	283,5
2	<i>Cyclops vicinus</i>	9,2	478,4
3	Наупліуси	8,2	32,8
4	Копеподити	4,2	71,4
	Всього	29,7	866,1

Cladocera

1	<i>Bosmina coregoni</i>	0.8	6.4
2	<i>Daphnia cucullata</i>	5,3	238,5
3	<i>Diaphanosoma branchiurum</i>	0.7	28.0
4	<i>Leptodora kinti</i>	0.5	44.5
	Всього	6.8	317.4
	Всього зоопланктону	64,4	1150,18

*)Примітки: Ч - чисельність тис. екз/м³; Б – біомаса мг/м³.

Іхтіофауна. Встановлення фауністичного складу риб в Основ'янській водоймі потребує додаткових досліджень. Аналіз літературних даних свідчить про те, що у цій водоймі можуть існувати до 35 видів риб перелік яких наведено у роботі [1]. У той же час, чотири види риб, а саме: карась звичайний, вирезуб, білизна європейська та ялець Данилевського, які раніше траплялися у межах міста, зникли зі складу іхтіофауни [1]. У Основ'янській водоймі станом на 2025 рік відсутні види риб що підлягають охороні.

Попереднє обстеження свідчить про можливість розширення рекреаційного потенціалу цього району, зокрема за рахунок аматорського рибальства.

В Україні відмічається зацікавленість дослідників у вивченні різноманітних підходів до використання іхтіофауни як індикатора стану гідроекосистем (Антоновский А. Г. та ін., 2008; Гончаренко Н. І., 2008; Ситник Ю. М., 2008). Головною причиною вивчення біологічних складових екосистем вважається те, що живі організми відображають сукупний вплив факторів середовища. Крім того, біологічні показники дають узагальнену характеристику умов існування гідробіонтів за весь період їх життя. У той же час, аналіз хімічного стану води свідчить про умови існування лише під час безпосереднього відбору проб. Відомо, що біологічний контроль може бути відносно недорогим, порівняно з хімічним (Петрук А. М., 2013).

Численні публікації вітчизняних та зарубіжних дослідників свідчать про успішність використання риб як індикаторів порушень стану водних екосистем при забрудненні вод. В умовах інтенсивного забруднення ступінь стійкості організму риб визначається здатністю ефективно виводити забруднюючі речовини, що надходять в організм. Патологічні зміни в організмах риб дозволяють визначити ступінь токсичності водного середовища, оцінити кумулятивні ефекти, а також сформулювати уявлення про потенційну небезпеку окремих речовин, що надходять у водойму, як для їх екосистем, так і для людини. Актуальність цієї проблеми зумовлена ще й тим, що іхтіофауна — дуже важливий компонент біоти, який значною мірою визначає стан водної екосистеми у цілому (Грициняк І. І., Третяк О. М., 2007; Клименко М.О., Бєдункова О.О., 2017), а водойма використовується населенням для аматорської риболовлі.

Оцінка стану водних об'єктів за результатами досліджень іхтіофауни є важливим напрямком таких робіт. На багатосторонній підхід з використанням структурно-функціональних характеристик різних груп гідробіонтів, в тому числі і риб, орієнтована і Водна Рамкова Директива Європейського Союзу 2000/60/ЄС.

Розмірно-вагові, або морфометричні ознаки справедливо вважаються сумарним відображенням специфіки образу життя риб, індикатором стану популяції, що формується внаслідок дії цілого комплексу екологічно вагомих факторів середовища [7]. При цьому за однакового температурного режиму на ріст риб, і відповідно на лінійні розміри, впливає як кормова база, так і екологічний стан водойм (Романенко В. Д., 2001).

При відборі проб, з дозволу рибалок-аматорів, було переглянуто їх улов та відібрано луску риб для визначення швидкості росту риби в Основ'янській водойми. Після цього було проведено порівняння цих величин з аналогічними показниками інших водних об'єктів Харкова і Харківської області (табл. 4-6).

Таблиця 4 – Середні величини росту плітки на території Харкова та Харківської області, см (див. Старко М. В., 2024)

Річка, місце вилову риби	Роки життя			
	1	2	3	4
У Харківській області				
Р. Сів. Донець, у межах Чугуївського р-ну	5,2	9,6	12,4	-
Річка Сів. Донець, сел. Есхар	4,4	7,9	12,4	16,2
Річка Сів. Донець, сел. Мілове	4,2	7,8	12,3	-
Річка Сів. Донець, Нижче м. Ізюм	3,7	6,1	-	-
Річка. Вовча, гирлова ділянка	4,2	8,0	-	-
Річка Уди, вище м. Золочева	4,5	8,2	11,2	-

Річка Уди, гирлова ділянка	4,9	8,1	15,4	-
Річка Оскол, гирлова ділянка	5,2	8,5	-	-
Оскільське водосховище (до війни)	4,8	9,6	12,7	15,6
Верхній Старолюботинський пруд	7,8	13,1	17,8	21,7
У межах міста Харків				
Річка Лопань біля Центрального ринку	3,9	6,3	11,2	12,6
Основ'янська водойма	5,0	8,1	12,1	15,6

Таблиця 5 – Середньорічні дані з росту ляща у водних об'єктах на території Харкова та Харківської області, см (див. Старко Н.В., Гутков Г. В., 2017; Старко Н. В., Евтушенко А. В., 2018)

Водний об'єкт	Вік риби		
	1	2	3
У Харківській області			
Печеніжське водосховище	7,7	15,1	21,2
Рогозянське водосховище	7,7	14,3	20,8
Берекське водосховище	8,4	13,0	18,3
Краснопавлівське водосховище	7,1	17,7	22,0
Оскільське водосховище (до війни)	9,8	16,4	23,4
У межах міста Харків			
Основ'янська водойма	6,1	13,2	19,1

Таблиця 6 – Середньорічні дані з росту верховодки у водних об'єктах на території Харкова та Харківської області, см (див. Старко М. В., 2024)

Водний об'єкт, місце вилову риби	Роки життя		
	1	2	3
У Харківській області			
Річка Уди, Рогозянське водосховище	4,3	6,5	9,1
Ставок біля сел. Липці	3,8	6,3	8,6
У межах міста Харків			
Річка Уди, гідропарк вище ТЕЦ 5	4,0	6,2	8,7
Річка Харків, Журавлівське водосховище	4,2	6,4	8,9
Річка Лопань біля Центрального ринку	3,5	5,9	8,2
Основ'янська водойма	4,1	6,0	8,4

Дані таблиць свідчать, що величини росту масових риб Основ'янській водойми (плітки, ляща та верховодки) практично не відрізняються від таких у водних об'єктах Харківської області та перевищують їх у межах міста Харків. Відсутній вплив виробництва з видобутку піску на умови існування риб в Основ'янській водоймі, незважаючи на те, що розробка кар'єру ведеться тут з 1931 року.

Висновки

1. Гідрохімічний стан Основ'янської водойми за основними показниками відповідає рибогосподарським нормативам якості води. Крім того, за даними Регіонального офісу водних ресурсів у Харківській області, вода Основ'янської водойми відповідає нормативу токсичності - відсутність гострої летальної токсичності згідно з «Методикою визначення рівнів токсичності поверхневих і зворотних вод для контролю відповідності їх якості встановленим нормативним вимогам». Такі води відносяться до 1 класу якості «чисти».

2. Фітопланктон складається з 42 видових та внутрішньовидових таксонів 7 відділів, характеризується як невисоке видове різноманіття планктонних водоростей для літнього сезону. Загальний розвиток фітопланктону складав за чисельністю 21,82 млн. кл/л, за біомасою - 2,28 мг/л.

3. У складі зоопланктонного угруповання було виявлено 21 таксон 3 систематичних груп: *Rotatoria*, *Cladocera* та *Copepoda*. Основу зоопланктону Основ'янської водойми складали коловертки (*Rotatoria*) та веслоногі рачки (*Copepoda*). Загальна чисельність зоопланктону Основ'янської водойми у липні 2025 року була 64,4 тис. екз/м³, біомаса – 1150,18 мг/м³.

4. В Основ'янській водоймі можуть існувати до 25 видів риб. Відсутні види, які підлягають охороні. Величини росту масових риб Основ'янської водоймі (плітки, ляща та верховодки) практично не відрізняються від таких у водних об'єктах Харківської області та навіть перевищують їх у межах міста Харків. Не встановлена наявність негативного впливу видобутку піску на умови існування риб в Основ'янській водоймі.

5. Використання Основ'янської водойми Може бути рекомендовано як для добування піску, так і для розвитку рекреаційного потенціалу міста.

Література

1. Гончаров Г. Л., Васенко О. Г., Туразіані Г. Д. Огляд фауни риб водних об'єктів міста Харків. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Біологія», 2023, 41, 62–76.
2. Луганська В.О. Водоплавні птахи на штучних водоймах Харківської області у зимовий період. - Сьома міжнародна конференція молодих учених «Харківський природничий форум». (16-17 травня 2024 р.): збірник наукових праць. – Харків: ХНПУ імені Г. С. Сковороди, 2024. – С. 122-125.

3. Кобяков Д. О. Загальна характеристика видового складу іхтіофауни озера Котлован (м. Дніпро). - Біорізноманіття та роль тварин в екосистемах: Матеріали XII Міжнародної наукової конференції присвяченої 105-річчю Дніпровського Національного Університету імені Олеся Гончара. - Дніпро: Середняк Т. К., 2023. – С. 3-5.
4. Іванов Є., Біланюк В. Ревіталізація кар'єрів будівельної сировини в межах Львівської агломерації. Туризм. Географія. Екологія: іновачії, освіта, бізнес : матеріали II-ї міжнародної науково-практичної онлайн-конференції (20–21 березня 2025 р., м. Житомир). За заг. ред. І. К. Нестерчук. Житомир: Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2025. С. 168–171.
5. Нормативи екологічної безпеки водних об'єктів, що використовуються для потреб рибного господарства, щодо гранично допустимих концентрацій органічних та мінеральних речовин у морських та прісних водах (біохімічного споживання кисню (БСК-5), хімічного споживання кисню (ХСК), завислих речовин та амонійного азоту). - Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України 30.07.2012 № 471.
6. СОУ-05.01.-37–385:2006. Вода рибогосподарських підприємств. Загальні вимоги та норми. Київ: Міністерство аграрної політики України, 2006. - 15 с.
7. Звіт про надання послуг за договором від 20.11.2024 №15/74 «Вимірювання показників якості поверхневих вод ТОВ «КАР'ЄР ОСНОВА» (заклучний). - Харків: Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області, 2024. -31с.

Васенко О. Г., канд. біол. наук, доц.;

Черба О. В., наук. співр.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РИБНОЇ ГАЛУЗІ

На сьогоднішній день риба і рибна продукція займають одне з найважливіших місць у світовій торгівлі. Частка виробленої в світі риби (харчової і нехарчової), яка в різних формах потрапляє на міжнародні товарні ринки, складає близько 35%.

Протягом останніх 60 років темпи зростання споживання харчової риби в світі значно перевищують темпи зростання населення. Так, у 1961 – 2017 роках загальний обсяг споживання в середньому становив 3,1% на рік, випереджаючи темпи річного приросту населення (1,6%). Темпи зростання показника випереджають швидкість росту споживання всіх інших тваринних білків (м'яса, яєць, молока – в середньому 2,1% на рік) за винятком птиці, споживання якої збільшується на 4,7% на рік. При цьому обсяги промислу вже кілька десятиків років істотно не змінюються і складають близько 90 млн т на рік. Збільшення обсягів відбувається за рахунок розвитку аквакультури [1].

Згідно звіту Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) за 2020 рік, споживання харчової риби на душу населення збільшилося з 9 кг (в еквіваленті живої ваги) у 1961 році до 20 кг у 2017 році та з кожним роком зростає [2]. У Європі цей показник становить у середньому близько 22 кг. Взагалі, 2020 рік вважається початком нової ери збільшення споживання морепродуктів. Карантинні обмеження, крах сектора громадського харчування, видалена робота, закриття шкіл – всі ці руйнівні сили, викликані коронавірусом, сприяли збільшенню обсягів вживання морепродуктів. У 2024 році середнє споживання риби в світі на людину склало вже 21,2 кг на рік.

При цьому, починаючи з 2014 року, світове населення споживає в їжу більше штучно вирощеної риби, а не видобутої традиційним рибальством. За оцінками фахівців, до 2030 року частка вирощеної риби становитиме 60%.

Основними видами риб в промисловому рибальстві світу є наступні: перуанський анчоус, минтай, смугастий тунець, сардінелла, оселедець, скумбрія японська, північна путасу, десятиперая ставрида, тунець жовтоперий, японський

анчоус, атлантична тріска, риба-шабля, скумбрія атлантична, європейська сардина, аргентинський кальмар-іллекус, кальмар-дозідікуси, макрель, кілька балтійська і чорноморська, желтохвост, мойва, японський синій краб, креветки, мексиканський менхеден, канагурта, далекохідна сардина.

З промислової точки зору ці риби поділяються на:

- морських, що завжди живуть в морі;
- прохідних, які проводять частину життя (велику) в морі та частина в річках, куди вони заходять в прісну воду для ікрометання;
- прісноводних, що живуть постійно в річках, озерах тощо [3].

В Україні рибна продукція в більшості є привозною. Частка імпорту складає близько 80% (рис. 1). В умовах воєнного стану вона підвищилась і становить вже більше 90%. Основними імпортерами риби є Норвегія, Ісландія та США. Лідер споживання – оселедець. Крім оселедця, в значних обсягах імпортується скумбрія, хек, салака, лосось, кілька, минтай, мойва, сардини, нототенія.

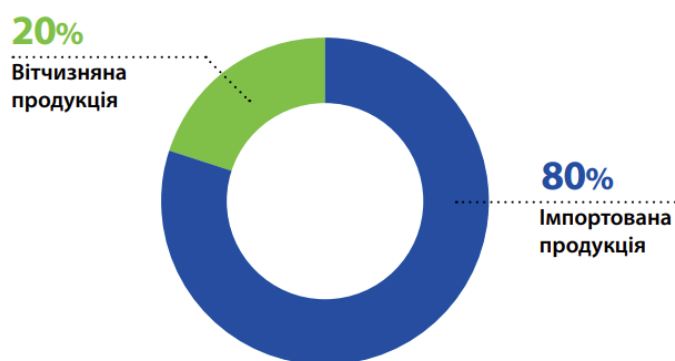


Рисунок 1 – Доля імпорту в загальному обсязі споживання рибної продукції [4]

Обсяги імпорту риби в Україну наведено на рисунках 2, 3.

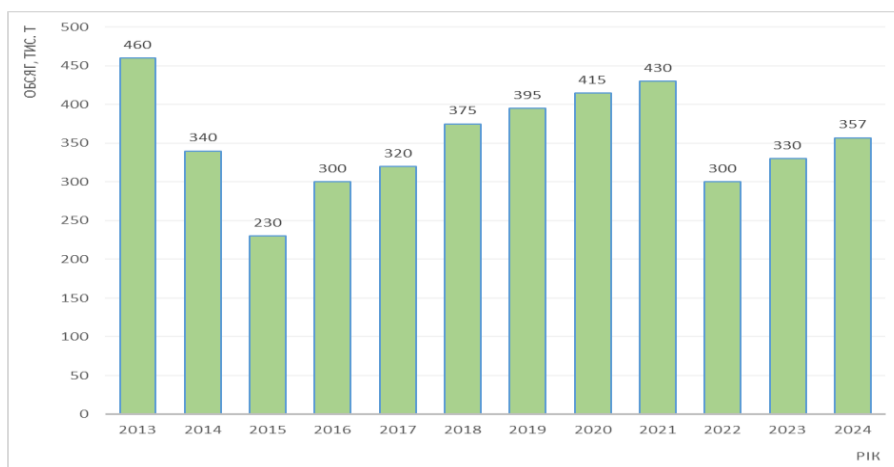


Рисунок 2 – Обсяги імпорту риби в Україну (тис. т)

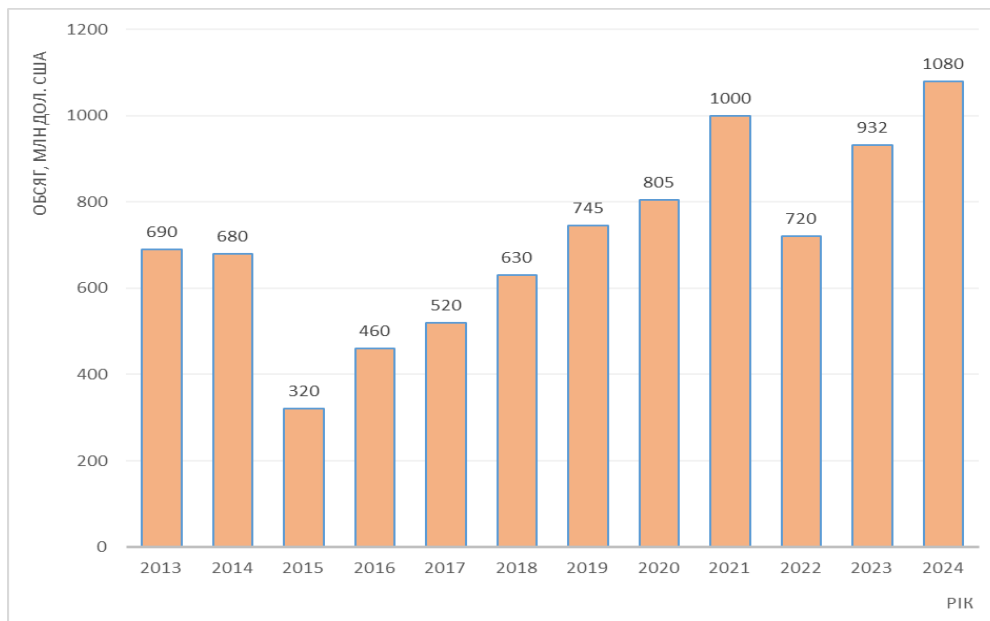


Рисунок 3 – Обсяги імпорту риби в Україну (млн дол. США)

Основними складовими рибної галузі України є наступні: прісноводна аквакультура, промисел на морському континентальному шельфі (Чорне та Азовське моря з лиманами) і промисел у внутрішніх водах [5]. При цьому, частка аквакультури складає близько 25% від загального вилову. Лідерами з виробництва продукції аквакультури в останні роки є Черкаська, Львівська, Хмельницька, Кіровоградська та Сумська області. Традиційними об'єктами аквакультури незмінно залишаються коропові.

Основу уловів складають карась сріблястий, лящ, плітка, плоскирка, рослиноїдні риби, тюлька, судак. Рибна промисловість виробляє морожену, охолоджену, солону, копчену рибу, рибні консерви, а також кормове борошно та іншу продукцію.

Двадцять років тому в Україні здобувалося близько 400 тис. т риби щорічно (рис. 4, 5). На жаль, в подальшому цей потенціал і можливості промислу в морських економічних зонах інших країн було втрачено, в результаті чого видобуток водних біоресурсів скоротився до 220 – 250 тис. т на рік (2007 – 2013 рр.). В результаті анексії Кримського півострова у 2014 році, видобуток знизився до 90 тис. т на рік (2014 – 2017 рр.) [1].

Внаслідок повномасштабного вторгнення РФ промисел в Азовському та Чорному морях було заблоковано, що також відобразилося на обсязі та складі виловів. Наразі не здійснюється промисловий вилов таких морських видів, як калкан, глоса, кефалеві, хамса, рапана, бичок, креветка, пеленгас, які становили значну частку

промислу у довоєнні роки.

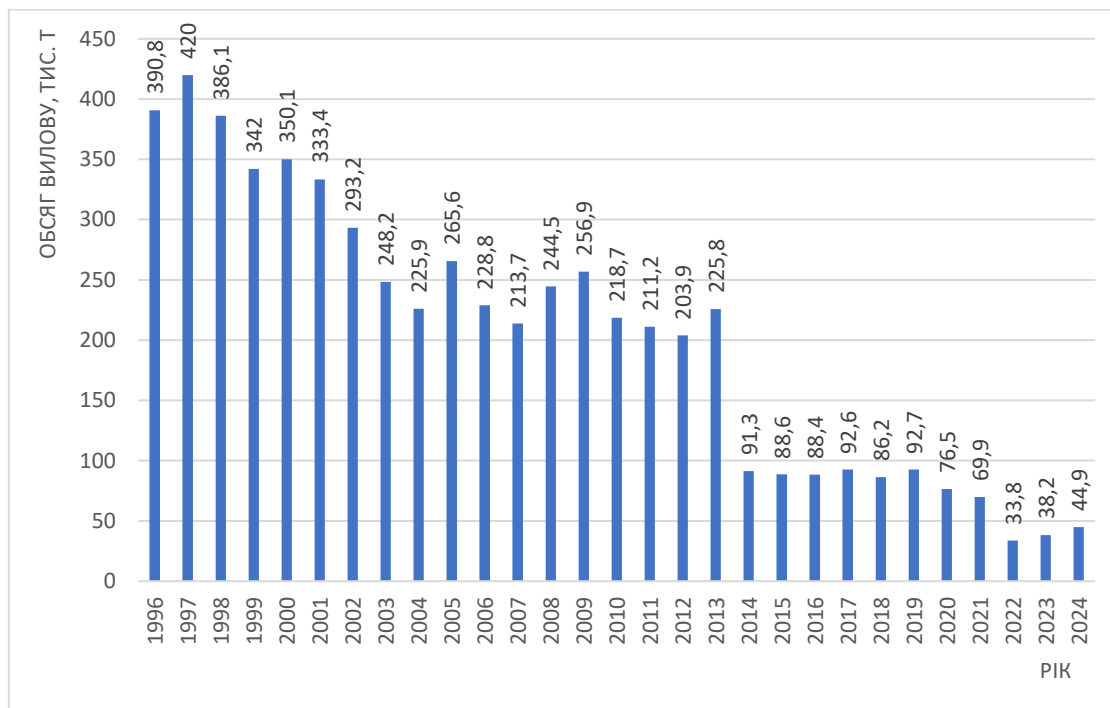


Рисунок 4 – Добування водних біоресурсів в Україні (1996 – 2024 рр.)

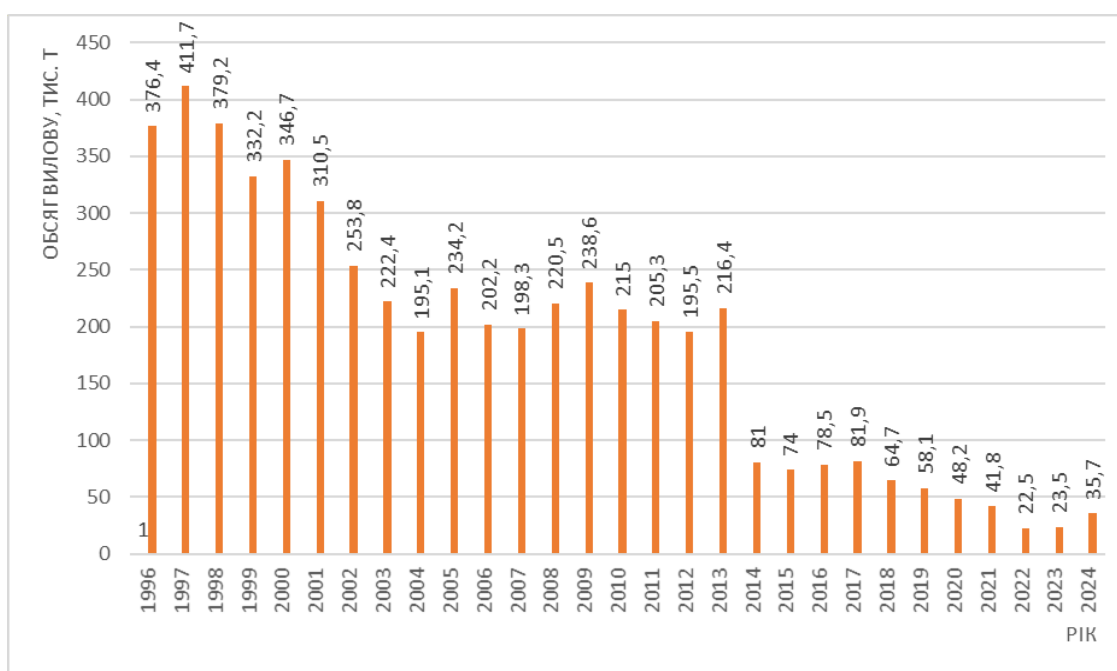


Рисунок 5 – Вилов риби в Україні (1996 – 2024 рр.)

Терористичне знищення окупантами Каховської ГЕС призвело до осушення Каховського водосховища, середній промисловий вилов якого складав близько 3 тис. т на рік.

Постійні обстріли, проблеми з логістикою, кадрові проблеми, черги на кордонах,

блокування пунктів пропусків на західних кордонах суттєво ускладнюють роботу галузі.

Окрім цього чинниками, що зумовлюють зниження обсягів добування водних біоресурсів, є недостатнє зариблення водойм, неналежний стан запасів основних промислових видів риб в Азово-Чорноморському басейні, недостатня кількість риболовних суден, їхній незадовільний технічний стан тощо [1].

Одночасно, в Україні зберігається проблема браконьєрства та неконтрольованого (незаконного) рибальства, у зв'язку з чим частина продукції залишається «в тіні». Практично кожен день Держрибагентство звітує про затримання браконьєрів рибної продукції в водоймах України [3].

Співвідношення між окремими складовими рибної галузі України наведено на рисунку 6.

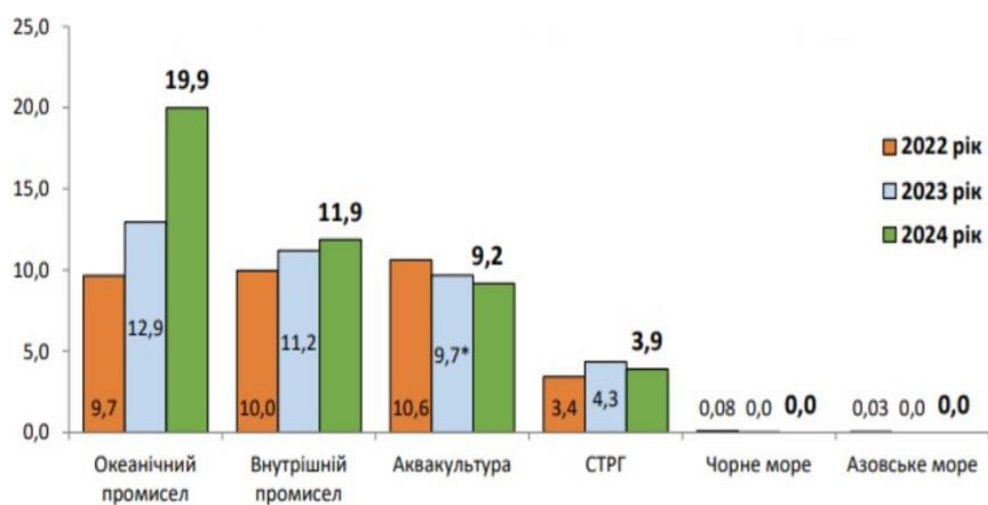


Рисунок 6 – Виллов водних біоресурсів (тис. т) окремими галузями водного господарства України [6]

Помітний сегмент у формуванні промислової рибопродукції водних об'єктів України займають внутрішні водойми, які забезпечуючи в останні роки біля 30 – 40% загального улову харчових водних біоресурсів (у 2010 – 2013 рр. цей показник становив 10 – 15%) [1]. Наразі, у зв'язку з тимчасовою недоступністю значної акваторії Чорного та Азовського моря для здійснення промислу, роль внутрішніх водойм у забезпеченні населення України високоякісною рибною продукцією суттєво зростає – на частку водосховищ, річок та гирлових систем припадає більше 85% загального улову риби у рибогосподарських водних об'єктах та на континентальному шельфі України.

Інформація щодо обсягів вилучення окремих видів водних біоресурсів на певних водних об'єктах країни за останні три роки наведена в таблиці 1.

Як видно з таблиці, вилов водних біоресурсів поступово відновлюється, однак ще не досяг довоєнних обсягів.

Таблиця 1 – Обсяг виловлення окремих видів водних біоресурсів на певних водних об'єктах

Назва водного об'єкту	Вилівлено водних біоресурсів, т		
	2022	2023	2024
Дніпровське водосховище	76,2	729,1	686,1
Дніпровсько-Бузька гирлова система	338,6	328,5	568,4
Кам'янське водосховище	223,5	2 492,7	2 535,3
Канівське водосховище	63,5	674,8	511,9
Каховське водосховище	0	0	0
Київське водосховище	455,0	714,1	584,5
Кременчуцьке водосховище	418,2	4 941,0	5 626,3
Кучурганське водосховище	0	0	0
Пониззя річки Дністер та Дністровський лиман	69,15	1 034,0	1 173,6
Річка Десна з озерами в межах Чернігівської області	0,3	11,9	3,2
Річка Дніпро в межах Чернігівської області	0,4	19,2	15,7
річка Дунай	22,0	125,2	138,3
Причорноморські лимани	85,0	120,0	39,2

Висновки

Рибна галузь, як на глобальному, так і на національному рівні, демонструє стійку динаміку трансформацій. У світі спостерігається стабільне зростання споживання рибної продукції, що випереджає темпи приросту населення, і ключову роль у цьому відіграє аквакультура, частка якої вже перевищила половину від загального обсягу споживання. Натомість, рибна галузь України характеризується високою залежністю від імпорту, який перевищує 90% від усього рибного ринку. Скорочення обсягів промислового рибальства, втрата доступу до морських ресурсів через воєнні дії, незадовільний стан рибальського флоту, руйнування гідротехнічної інфраструктури та браконьєрство є чинниками, які негативно впливають на економічний потенціал і міжнародну залежність держави від рибного імпорту, а головне, не сприяють забезпеченню внутрішнього ринку України важливою білковою продукцією. Водночас, аквакультура в Україні активно розвивається, особливо в центральних та західних регіонах, хоча її внесок у загальну структуру видобутку рибної продукції поки що залишається незначним. В умовах війни зростає значення внутрішніх водойм, з яких сьогодні надходить понад 85% уловів.

Цей факт свідчить про адаптацію галузі до обмежених природних і логістичних умов.

Перспективи розвитку рибної галузі України передбачають кілька ключових напрямів:

- створення умов для інтенсивного розвитку аквакультури, зокрема шляхом залучення інвестицій, запровадження сучасних технологій вирощування риби та стимулювання науково-дослідної діяльності в цьому напрямку;
- відновлення та підтримка промислового рибальства на внутрішніх водоймах за рахунок розвитку програм зариблення і модернізації риболовецького флоту;
- посилення заходів для боротьби з браконьєрством (цифровізація контролю, притягнення до відповідальності, запровадження дієвих штрафів);
- розвиток кооперації між дрібними виробниками;
- стимулювання внутрішнього споживання української рибної продукції та розширення експортного потенціалу.

У довгостроковій перспективі рибна галузь України може стати важливою складовою продовольчої безпеки та економічного зростання країни за умов системної підтримки з боку держави.

Література

1. Державне агентство меліорації та рибного господарств України. Електронний ресурс. URL: <https://darg.gov.ua>
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Publications. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/2>
3. Асоціація «Українських імпортерів риби та морепродуктів» (UIFSA). Електронний ресурс. URL: <https://uifsa.ua/news/news-of-ukraine>
4. Зелена книга. Аналіз рибної галузі України. К: Офіс ефективного регулювання. 228 с. URL: <https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/ZK-Analiz-rybnoi-galuzi-Ukrai-ny.pdf>
5. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Електронний ресурс. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/natsionalni-dopovid-pro-stan-navkolyshnogo-prirodnogo-seredovyshha-v-ukrayini>

6. Публічний звіт голови державного агентства України з розвитку меліорації, рибного господарства та продовольчих програм Владислава Невеселого за 2024 рік. Державне агентство України з розвитку меліорації, рибного господарства та продовольчих програм. К. 2025. 18 с. URL: https://darg.gov.ua/_plani_roboti_ta_zviti_0_1045_menu_0_1.html

Васютинська К. А., канд. хім. наук, доц.;

Перекрест А. Л., д-р техн. наук, проф.;

Вадурін К. Л., аспірант;

Корцова О. Л., канд. техн. наук, доц.

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,

м. Кременчук, Україна

АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯ

Сучасні виклики управління екологічною безпекою в умовах інтенсивної урбанізації вимагають якісно нових підходів до моніторингу довкілля, що є базовою передумовою оцінювання стану навколишнього середовища, динаміки урбанізаційних ризиків та потенційних загроз для населення. У регіонах України, де спостерігається просторово нерівномірне урбогенне навантаження, поєднання природно-техногенних факторів з наслідками воєнної агресії створює складне середовище для прийняття ефективних управлінських рішень. Особливої ваги набуває потреба в системах, здатних опрацьовувати постійно оновлюванні, часто неповні або гетерогенні дані моніторингу.

Існуючі підходи зазвичай зосереджуються на фрагментарному аналізі, зокрема, прогнозуванні концентрацій забруднювачів, кластеризації територій або обчисленні локальних індексів. Проте у відриві від єдиного аналітичного простору результати таких досліджень часто залишаються поза рамками практичного використання. Розрив між моніторинговими даними та системами ухвалення рішень унеможливорює оперативне реагування на зміну ризиків, що особливо критично для регіонів із високим рівнем урбанізаційного стресу.

У цьому контексті розробка моделей, здатних забезпечити повний аналітичний цикл, від формалізації індикаторів еколого-демографічної урбанізації та оцінювання факторних ризиків до інтегрованого індексу й автоматизованої підтримки рішень, є актуальним науковим і практичним завданням. Застосування алгоритмів машинного навчання, методів онлайн-оновлення кластерних структур та інструментів фільтрації шуму сприяє створенню адаптивних систем, що здатні не лише інтерпретувати наявні

дані, а й самонавчатися на нових спостереженнях. Такий підхід підвищує точність прогнозів, релевантність інтервенцій та стійкість систем екологічної безпеки в умовах невизначеності та змінності середовища.

Тож, **метою** дослідження є розроблення адаптивного конвеєру перетворення моніторингових даних на управлінські рішення для оцінювання екологічних ризиків, що забезпечує кластеризацію територій та динамічну підтримку рішень на основі постійно оновлюваних і гетерогенних екологічних даних.

Аналіз сучасних моделей засвідчує низку системних обмежень, що знижують їхню ефективність для управління ризиками в екологічній сфері. Передусім, більшість рішень залишаються фрагментарними: вони зосереджені на окремих етапах аналізу даних і не забезпечують логічного переходу до конкретних управлінських дій. Висока чутливість до якості вхідних даних і нестабільність ETL-процесів призводять до спотворення результатів, зокрема через відсутність уніфікації одиниць виміру, нормалізації та обробки викидів. Кластеризація часто має описовий характер і не перетворюється на дієві стратегії. Індeksi ризику зазвичай статичні, не враховують нові дані, бракує механізмів їх онлайн-калібрування. У підсумку спостерігається розрив між аналітичними результатами й прийняттям рішень: навіть за наявності оцінок ризику відсутні інструменти оптимізації дій з урахуванням обмежених ресурсів, термінів реалізації та очікуваної ефективності результатів.

Запропонована нами модель орієнтована на реалізацію наскрізного інтегрованого аналітичного циклу від формалізації індикаторів урбанізації, побудови факторних індикаторів ризику до обчислення комплексного індексу ризику, динамічної кластеризації регіонів і розгортання модуля підтримки прийняття рішень. Такий підхід дозволяє забезпечити не лише системне оцінювання урбанізаційних ризиків, але й трансформацію результатів аналізу у практичні управлінські дії. Актуальність моделі зумовлена необхідністю використання робастних методів обробки даних, зокрема фільтрації шуму, автоматизованого виявлення викидів, інкрементального (онлайн) оновлення вагових коефіцієнтів і центрів кластерів. Це забезпечує здатність моделі до адаптації у разі надходження нових або змінених даних, зберігаючи стабільність і точність оцінок. Додаткову цінність становить інтеграція всіх компонентів у єдиний наскрізний цикл, включно з компонентами штучного інтелекту, що підвищує прогнозну точність та адаптивність системи до змінних просторово-часових умов, характерних для екологічної динаміки урбанізованих територій. Модель залишається прозорою завдяки використанню інтерпретованих індексів та статистично обґрунтованих вагових

коефіцієнтів, що дозволяє не лише здійснювати кількісне оцінювання ризиків, але й пояснювати логіку ухвалених рішень. Такий рівень інтерпретованості критично важливий для підвищення довіри до результатів аналітики у сфері управління екологічною безпекою, особливо в контексті державного і муніципального планування.

Крім того, архітектура моделі є масштабованою й модульною: вона легко інтегрується з новими джерелами даних, включаючи сенсорні платформи, супутникові спостереження чи адміністративну статистику. Це забезпечує її адаптивність до різних рівнів деталізації від локального (міського) до регіонального чи національного. Завдяки цим властивостям модель може бути інтегрована до систем моніторингу й підтримки управлінських рішень, формуючи основу для розробки сценаріїв сталого розвитку, адаптаційних стратегій і зниження ризиків у реальному часі.

Загальну архітектуру моделі подано на рисунку 1, що демонструє взаємозв'язки між основними компонентами та потоками даних. Архітектура моделі структурована у послідовність взаємопов'язаних етапів, кожен з яких має власні вхідні дані, методи обробки та вихідні результати, зберігаючи при цьому прозорість перетворень і відтворюваність обчислень.

Модуль підтримки прийняття рішень завершує інтегрований аналітичний цикл, перетворюючи результати кластеризації та індексної оцінки на обґрунтовані управлінські дії. На відміну від традиційних експертних систем, він реалізує адаптивний підхід із безперервним навчанням на основі ефективності заходів і змін екологічної ситуації. Його основою є багатокритеріальна оптимізація, що враховує ефективність, вартість і строки виконання. Методи машинного навчання дозволяють уточнювати ці оцінки, підвищуючи релевантність рішень у динамічному середовищі.

Запропонована методика побудови комплексного індексу ризику на основі t -критерію Стюдента забезпечує об'єктивність оцінювання завдяки статистичному визначенню ваг факторів без суб'єктивних експертних припущень. Її адаптивність полягає у здатності моделі автоматично оновлюватися при надходженні нових даних, а робастність – у вбудованих механізмах виявлення викидів і контролю статистичної значущості, що знижує вплив шумів. Модель також вирізняється прозорістю: всі розрахунки ґрунтуються на чітко визначених статистичних критеріях, що полегшує інтерпретацію та верифікацію результатів. Завдяки використанню інкрементальних алгоритмів, розроблена система є масштабованою й придатною до роботи з великими масивами даних у реальному часі.

Таким чином, модель є ефективним інструментом для моніторингу ризиків та ухвалення управлінських рішень в умовах динамічного середовища, що потребує надійних, адаптивних та прозорих методів оцінювання.

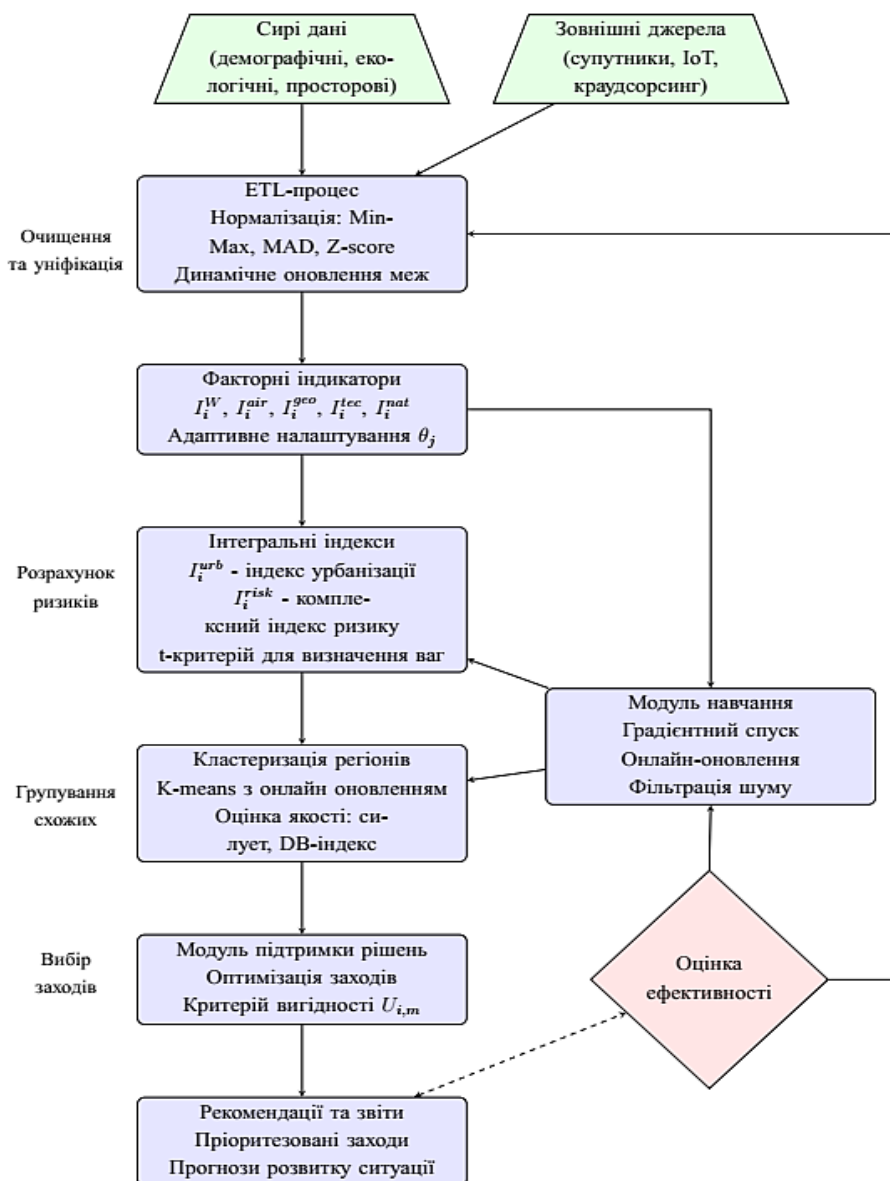


Рисунок 1 – Загальна архітектура моделі оцінки екологічних ризиків

Розроблена концепція була використана у валідації багатоетапного конвеєру обробки та аналізу даних, що трансформує розрізнені, «сирі» дані моніторингу якості повітря у структуровані аналітичні продукти, придатні для формування науково обґрунтованих управлінських рішень (рис. 2).

Система побудована у вигляді шести послідовних логічно пов'язаних етапів, кожен з яких виконує специфічну функцію підготовки та трансформації даних для наступного рівня аналізу. Алгоритм створення синтетичних даних підтримує режим

випадкової генерації, що імітує нерегулярні вимірювання та режим генерації за розкладом, що створює рівномірні вимірювання з фіксованою дискретністю (наприклад, кожні 20 хв) та наближує модель до автоматизованих систем моніторингу.

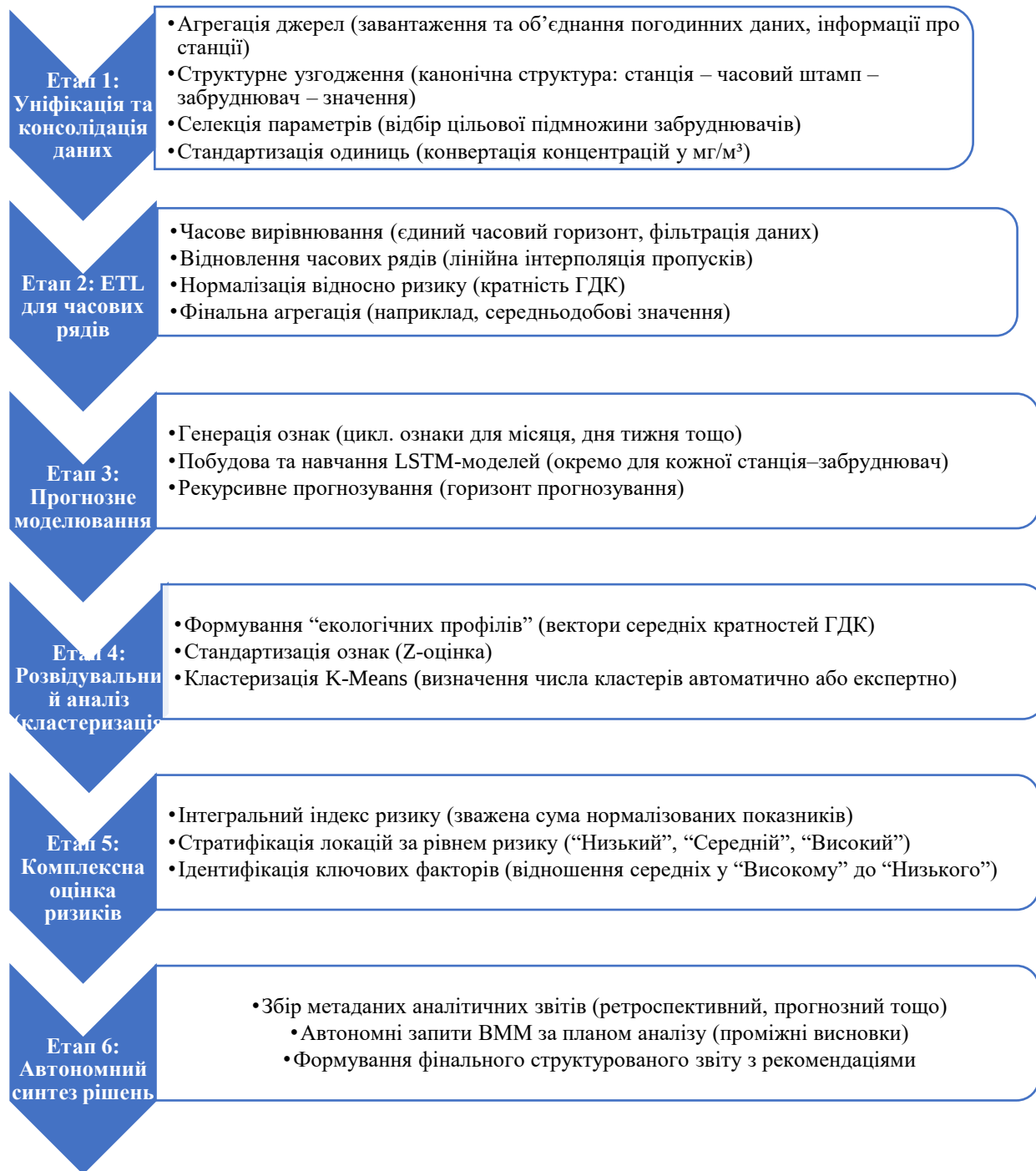


Рисунок 2 – Ієрархічний текстовий контур конвеєру обробки та аналізу даних для підтримки прийняття рішень

Для валідації запропонованої системи було створено еталонний синтетичний набір даних, що охоплює весь календарний 2024 рік і характеризується високою часовою роздільною здатністю із кроком у 20 хвилин. Генерація здійснювалася в

режимі максимальної інтенсивності, що забезпечило формування щільного масиву спостережень великого обсягу, придатного для стрес-тестування продуктивності та масштабованості системи, а також для перевірки її здатності виявляти довгострокові й сезонні закономірності у варіаціях забруднювачів.

Для наближення даних до умов реального моніторингу було враховано типові джерела похибок: по-перше, до кожного значення додано стохастичний шум рівня 10 %, що імітує короткотривалі флуктуації та випадкові похибки вимірювань; по-друге, введено механізм пропусків із ймовірністю 5 %, що відтворює втрати даних унаслідок перебоїв зв'язку чи технічних помилок. Таким чином, синтетичний набір відображає як структуру «чистих» вимірювань, так і реалістичні виклики, властиві практиці екологічного моніторингу.

Для додаткової перевірки стійкості та універсальності методології було використано реальний датасет «Air Quality Monitoring from EcoCity» [1], який містить результати громадського моніторингу повітря у місті Вінниця та прилеглих районах. Вінниця як репрезентативне українське місто із населенням близько 300 тис. осіб та розвиненою інфраструктурою є оптимальним прикладом для тестування масштабованості та прикладної цінності розроблених аналітичних інструментів.

Для валідації базової функціональності системи було використано ретроспективні дані за 2024 рік. Вбудований механізм визначення кількості кластерів (метод «лікоть») дозволив виявити оптимальне розбиття на п'ять кластерів, що свідчить про наявність п'яти відмінних екологічних профілів моніторингових станцій. Автоматичне ранжування кластерів за рівнем екологічної безпеки від найбезпечнішого (кластер 0) до найризикованішого (кластер 4) значно полегшило інтерпретацію результатів і візуалізацію. На наступному етапі проаналізовано прогнозні дані за січень 2025 року з обчисленням інтегрального індексу ризику для кожної станції з урахуванням ваг, де ключовим фактором виступав NO_2 . Це дозволило класифікувати станції за трьома рівнями ризику: низький, середній, високий. Зокрема, *Station-East-1*, *Station-South-2* та *Station-South-1* ідентифіковано як найбільш ризиковані. Аналіз показав, що різниця в середніх концентраціях між кластерами незначна, що вказує на багатовимірну природу ризику. Підсумкова валідація на регіональному рівні дозволила побудувати рейтинги небезпеки: у 2024 лідував регіон *South*, тоді як у прогнозі – *West*. Діаграма «Анатомія ризику» деталізує внесок кожного чинника, що критично важливо для регіонального екологічного планування (рис. 3).

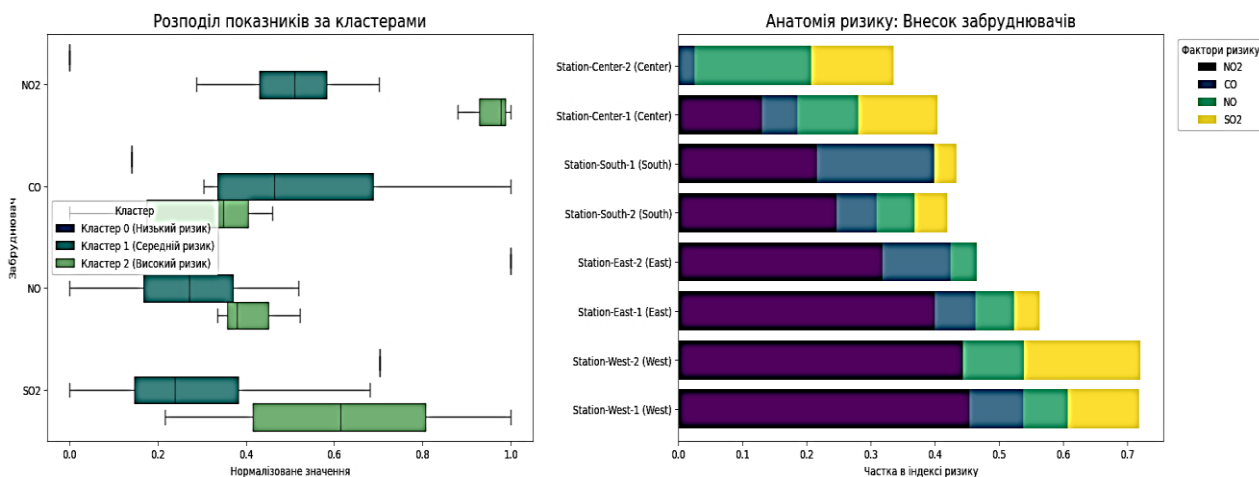


Рисунок 3 – Комплексний аналіз екологічного ризику на синтетичних ретроспективних даних

Завершальний етап валідації був присвячений оцінці здатності системи агрегувати показники на регіональному рівні. Для кожного з чотирьох регіонів розраховано середній інтегральний індекс ризику, що дозволило побудувати рейтинг екологічної небезпеки. У ретроспективному сценарії 2024 року найвищий ризик спостерігався в регіоні *South* (0.708), тоді як у прогнозі на 2025 рік лідирував регіон *West* (0.720). Візуалізація показала специфіку внеску факторів у кожному регіоні, що є ключовим для формування цільових заходів екологічного реагування.

Висновок

Запропонована інформаційна система моніторингу забезпечує повний аналітичний цикл від обробки сирих даних до управлінських рішень. Особливістю є удосконалений модуль прогнозування, в якому реалізовано автоматичний вибір оптимальної моделі часових рядів за MSE. Це забезпечує вищу точність прогнозів, особливо при складній динаміці показників. Удосконалення підвищує надійність системи для оцінки ризиків, стратифікації територій і підтримки адаптивного управління.

Література

1. Air Quality Monitoring from EcoCity. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/vbmokin/air-quality-monitoring-from-ecocity> (дата звернення: 22.08.2025)

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГЕОПОЛІМЕРІВ

Металургійні відходи в їх найрізноманітнішій номенклатурі, від шлаків і шламів до пилу і окаліни, є одним з найбільш масових джерел забруднення земної поверхні неорганічними копалинами. Тому кожен новий вид продукції, отриманий з таких відходів і має свою споживчу вартість, привертає увагу як вчених, так і підприємців. Одним з таких високоефективних продуктів є мінеральні полімерні речовини, або геополімери, до складу яких входять металургійні шлаки. Геополімери – це неорганічні полімерні матеріали з аморфною алюмосилікатною структурою, що складаються з ковалентних ланцюгів типу Si-O-Al-O (сіалати), які зміцнюються за рахунок лужної активації та поліконденсації, забезпечуючи міцність, хімічну стійкість та стійкість виробу.

Геополімерні матеріали використовуються в будівництві (геополімерний бетон, 3D-друк будівельних конструкцій, блоків і цегли без випалу), реставраційних роботах (фіксація ґрунтів і фундаментів) в Deep Injection (глибока ін'єкція), Slab Lift (стабілізація плит), PowerPile (геополімерні колони), при інкапсулюванні небезпечних і радіоактивних відходів. Це вогнестійкі покриття та клеї, високотемпературна кераміка, медичні біосумісні матеріали, космічні термостійкі композити тощо.

Функціональна схема (рис. 1) відображає технологічний процес виробництва геополімерних матеріалів з металургійного шлаку, який із зазначенням вхідних і вихідних потоків, параметрів енергоспоживання, докладно описаний в літературі [1, 2]. Діаграма побудована у вигляді послідовного ланцюжка процесів з вхідними (сировина, енергія) і вихідними (продукція, відходи) потоками, позначеними суцільними стрілками.

Основна сировина в технологічному процесі.

- Металургійні шлаки з технічними параметрами (табл. 1), це доменні гранульовані шлаки (маркування шлаку «BFS», код 2711.2.9.09–11), конвертерні шлаки (маркування шлаку «BOFS», код 2711.2.9.15–16). На одну тонну полімеру припадає 600-800 кг шлаку.

- Лужні активатори в кількості 150-200 кг/т продукції (луг натрію або калію, рідке скло, розчини соди).
- Коригувальні добавки: зола-винесення, метакполін, каолін.
- Дистильована вода для приготування активатора 100-150 кг/т продукції.
- Наповнювачі та добавки (наприклад, для бетону) - 0-100 кг/т продукції

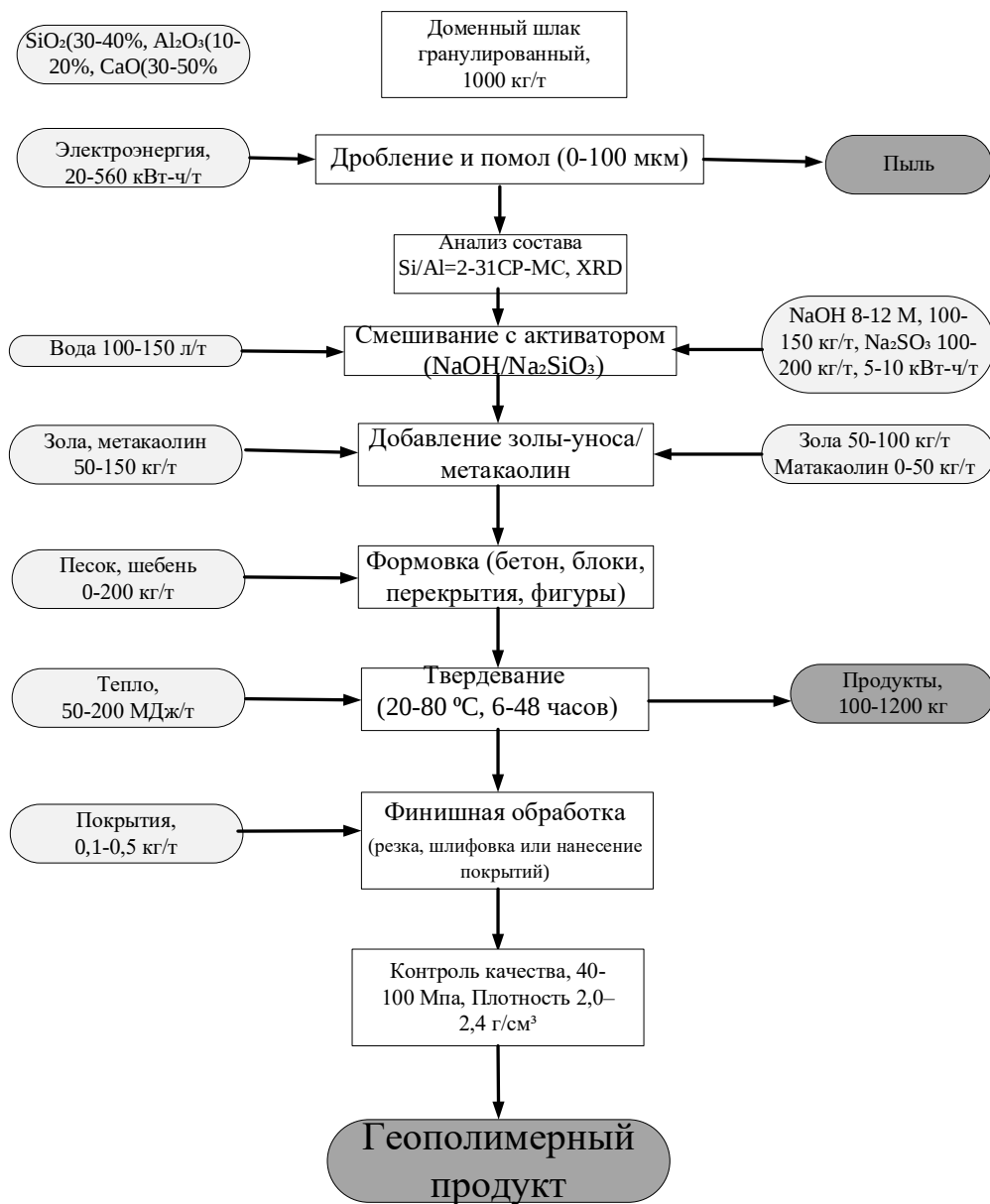


Рисунок 1 – Функціональна схема виробництва геополімерних матеріалів з металургійних шлаків.

До недоліків матеріалу, що досліджується, можна віднести його аморфну структуру, яка ускладнює аналіз фазового вмісту методами збереження (рентгеноструктурний аналіз). Ще одним недоліком є висока вартість лужних активаторів і вимога точного контролю складу суміші.

Металургійні шлаки відіграють домінуючу роль в таких технологіях і до їх попередньої обробки пред'являються високі вимоги. Технологія передбачає дроблення та подрібнення до частинок 0-100 мкм (питома площа поверхні 300-500 м²/кг) для підвищення конкурентоспроможності майбутнього геополімеру. Використання шлаку GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) доменної печі та шлаку EAF/BOF (електродуговий піч та конвертер) в оптимальних умовах дозволяє отримувати міцні, довговічні матеріали шляхом утилізації відходів та забезпечувати економічну ефективність, навіть без дорогих лугів, при економії енергії [2, 3]. Тому нас буде цікавити роль різних шлаків в структурі і якості геополімерних матеріалів.

Таблиця 1 – Хімічний склад і термодинамічні параметри шлаків для геополімеризації

Параметри шлаку	Численні значення параметрів				
	«BFS» (2711.2.9.09– 11)	«BOFS» 2711.2.9.15– 16	ΔH^0 , кДж/моль	ΔG^0 , кДж/моль	S^0 , Дж/мольК
Оксиди кремнію, SiO ₂ , %	35-45	10-28	-910	-856	41,5
Оксиди алюмінію, Al ₂ O ₃ (α-), %	10-13	5-10	-1675,7	-1582	50,9
Оксиди кальцію, CaO, %	25-35	45-60	-635,1	-603	39,8
Оксиди магнію, MgO, %	≤15	1-10	-601,6	-569	26,9
Оксиди заліза, FeO/Fe ₂ O ₃ , %	0,5-10	≥ 5 ≤ 10	-272 -824	Залежать від форми оксиду	S° varies
Оксиди TiO ₂ , MnO, P ₂ O ₅ , S, %	≤ 4	-	-	-	-
Гидравлічна активність	≥ 1,65	-	-	-	-

Скористаємося результатами дослідження таких сумішей з використанням спеціалізованих програм для розрахунку рівноваги у водних розчинах (PHREEQC), які були виконані авторами [3]. Такі результати, в порівнянні наявних параметрів алюмосилікатних гідрогелів, які були отримані за допомогою аналізу ядерного магнітного резонансу, дозволяють розрахувати діапазони так званих «теплових вікон» стабільності для гідрогелів, вивчених в [3], з урахуванням утворення стабільних багатовимірних фаз при різних комбінаціях температур, співвідношень SiO₂/Na₂O від температури і тривалості застигання суміші (рис. 2), що має значення для нашого дослідження.

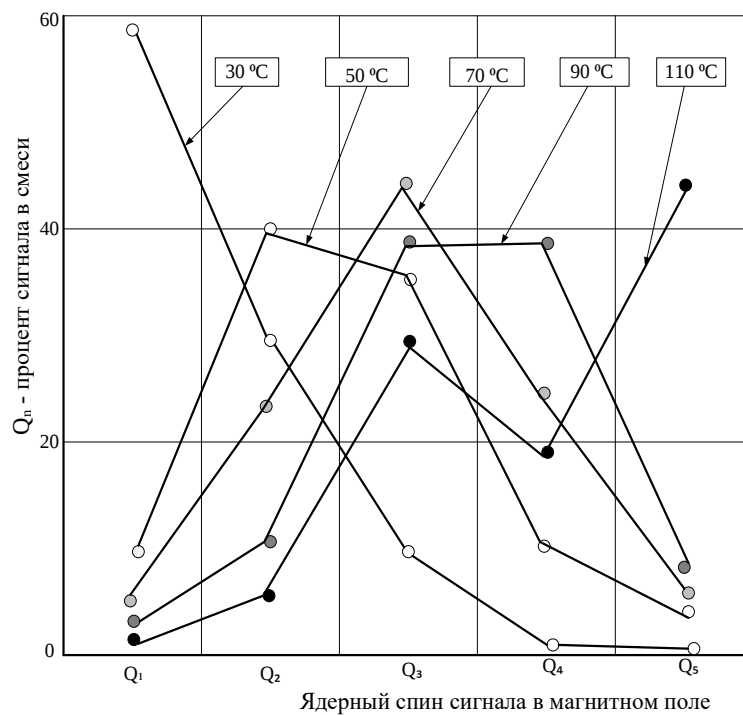


Рисунок 2 – Порівняльність параметрів геополімеризації з умовною структурою одержуваного гідрогелю.

*)Параметри: 1H - зв'язність води; ^{27}Al - координація алюмінію; ^{29}Si - ступінь поліконденсації силікатів; ^{23}Na та ^{39}K - положення і рухливість лужних катіонів (за даними роботи [3]).

Когезія води є ознакою утвореного гелю, стабільність інших сигналів дозволяє судити про наявність алюмінію і кремнію в процесі полімеризації від Q^0 монокремнію до сітчастих стійких $Q^3 \div Q^4$ структур, як показника «зрілості» геополімеру. Нестійка стабільність ЯМР-сигналу в суміші Q^n підтверджується її підвищенням при зростанні температури затвердіння ($pH\ 12-13,5$, $Вт/с < 0,5$, $T < 70\ ^\circ C$) і максимізацією при $T \gg 70\ ^\circ C$ в залежності від стабільності ядерного спину в ланцюгу $N-A-S-H$ гелю. Максимальна поліконденсація спостерігається при $T \sim 50-90\ ^\circ C$, модуль $SiO_2/Na_2O = 1,2$ [3].

Ми порівнюємо процеси геополімеризації для сумішей на основі доменних BFS і конвертерних BOFS шлаків. Узагальнені результати термодинамічного моделювання у співставленні з відомими результатами ЯМР, викладеними в [3], представлені в таблиці 2. Діапазон, в якому геополімеризація найбільш ефективна за рахунок стабільності фаз і мінімізації вилужування компонентів суміші, буде порівнюватися з термодинамічними параметрами підготовлених доменних та конвертерних шлаків. Результати наших розрахунків наведені на рис. 3.

Таблиця 2 – Термодинамічні потенціали і фазові переходи для системи $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{--NaOH--SiO}_2$

Температура (°C)	Модуль $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	pH	Стабільні фази	ΔG утворення (кДж/моль)	Зв'язок із якістю геополімера
Суміші на основі шлаку «BFS» (2711.2.9.09–11)					
25	0.8	12.5	мономірний розчин, Q ¹	–5÷–10	низька полімеризація, слабка структура
40–60	1.0–1.4	13–13.5	C–S–H, N–A–S–H гелі	–20÷–30	оптимальна структура, міцність
70–90	1.2	13.5	стабільні гелі та гідрогелі	–30÷–40	висока щільність, висока міцність
>90	>1.5	>13,5	алюмінати, карбонати, зеолити	>–10	ризик протікання і тріщин, нестабільність
Суміші на основі шлаку «BOFS» 2711.2.9.15–16					
25	0,65	10,2	нестабільний мономерний розчин, інертний до лужного середовища	+8	відсутність полімеризації, неструктурність
40–60	0,98	12,5–13,0		+5 ÷ 0	слабка полімеризація, недолік зовнішньої енергії
70–90	1,25	13,5–13,8	гідратація під впливом зовнішньої енергії	0 ÷ –10	Нестійка структура
>90	>1,35	>13,8	карбонати, гідроксиди, локальні алюмосилікати	–10÷–11	

Ми розрахуємо «теплове вікно» стійкості геополімерного гелю, при якому його ΔG мінімальний. «Теплове вікно» - це температурний діапазон, в якому геополімеризація найбільш ефективна, пов'язана з утворенням стабільних фаз, мінімізацією вимивання компонентів система, її знаходженням в стійкій рівновазі (низький ΔG).

Значення ΔG та pH розраховуються в PHREEQC/FactSage/Geochemist's Workbench для концентрацій розчинників, що використовуються в системах $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{--NaOH--SiO}_2$.

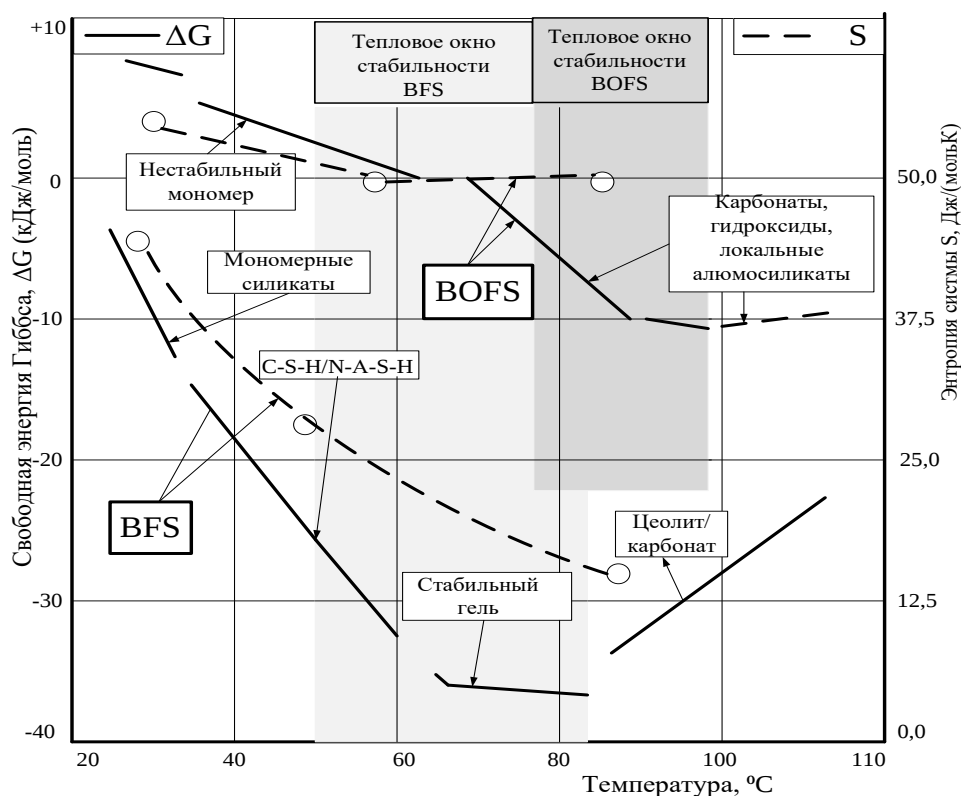


Рисунок 3 – Визначення умов стабільності для геополімеризації сумішей на основі доменних (BFS) та конвертерних (BOFS) шлаків.

Ці результати разом визначають «теплове вікно» стабільності, де оптимальна геополімерна структура для сумішей на основі BFS (2711.2.9.09–11) формується при $40 \div 70$ °C (модуль $1 \div 1,4$, pH $\sim 13 \div 13,5$), а для сумішей з BOFS (2711.2.9.15–16) лише приблизна структура формується при вищих температурах і в більш високолужному середовищі (90 °C, модуль 1,35, pH=14), (див. рис. 3).

Висока енергія Гіббса $\Delta G > 0$ в технологіях геополімеризації пов'язана з:

- алюмосилікатною збідненістю вихідної суміші;
- низьким рівнем pH, нестачою води, низькою температурою в зоні реакції;
- небажаними або нестабільними фазами, зокрема, карбонатів, гідроксидів, які не пов'язані з геополімерними структурами.

При малій енергії Гіббса шлаки легше активуються, особливо в присутності лужного середовища (NaOH , KOH), утворюючи стабільну $\text{N} - \text{A} - \text{S} - \text{H}$ або $\text{C} - \text{A} - \text{S} - \text{H}$. Низька енергія Гіббса $\Delta G < 0$ зв'язується з:

- активністю лужних реакцій в суміші, наприклад, при високому вмісті SiO_2 і Al_2O_3 ;
- утворенням термодинамічно стабільних фаз, таких як аморфні алюмосилікати;

-умовами реакції (високий рівень рН, температура і вологість суміші), які сприяють поліконденсації геополімерної матриці.

У зв'язку з бідністю активних кислотних компонентів і вмістом великої кількості компонентів вільного CaO і низької активності в лужному середовищі, конвертерний шлак важко піддається утворенню геополімерних гелів. Енергія Гіббса для формування геополімерних структур може бути позитивною, що означає, що спонтанні реакції утруднені, або вимагають модифікації складу і умов. Така система вимагає зовнішньої додаткової енергії, наприклад, додаткового нагріву суміші. Про неструктурований характер одержуваного продукту і його нестійкий стан свідчить також зміна ентропії кінцевого продукту, яка майже збігається з початковою ентропією шлакових компонентів (див. рис. 2).

Доменний шлак завдяки своєму високому вмісту SiO_2 і Al_2O_3 легко вступає в геополімеризацію в лужному середовищі, в той час як енергія Гіббса на для утворення гелів $N - A - S - H$ або $C - A - S - H$ негативна, тобто термодинамічний процес є спонтанним і стабільним. Про це свідчить 3,5-кратне зниження ентропії кінцевого гелю.

Таким чином, доменний шлак в геополімерній суміші можна вважати основним компонентом, конвертерний шлак, в силу своєї слабкої реакції на лужне середовище, може бути тільки допоміжним компонентом, як інертний наповнювач або стабілізатор, але ніяк не основне джерело геополімерних гелів.

Висновок

Технології отримання геополімерів, як високотехнологічних матеріалів з відповідними властивостями, є одним з унікальних застосувань металургійних відходів для величезної кількості споживачів.

Література

1. Davidovits J. Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications. Gordon and Breach Science Publishers. London. 2008. P.50-152.
2. Bajpai P. Handbook of Geopolymer Science and Technology. Springer, N.-Y., 2015. P.150-300.
3. Skane R., Jones F., van Riessen A. и др. "Optimisation of Activator Solutions for Geopolymer Synthesis: Thermochemical Stability, Sequencing, and Standardisation". arXiv, 15 июнь. 2025.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

РОЛЬ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ НЕРІВНОВАЖНОСТІ В КОНКУРЕНЦІЇ ЗА ПЛАНЕТАРНІ ЕКОСИСТЕМИ

Природа, умовно поділяючись на органічний і неорганічний світи, перебуває в постійній динамічній взаємодії. В основі такої взаємодії, в повній відповідності за другим законом термодинаміки, лежить термодинамічна нерівноважність систем, стан яких змінюється в часі від сильного порушення рівноважності до наближення до стану повної рівноваги в залежності від певних термодинамічних параметрів.

У загальному випадку співвідношення систем у стані термодинамічної нерівноважності є показником розвитку Природи на Землі. Чим більше локальних світів знаходиться в такому стані, тим різноманітніша наша Природа, тим більші перспективи її розвитку.

Існує безліч факторів, як природних, так і штучних, які перешкоджають зростанню термодинамічної нерівноважності в природі [1]. Наприклад, до перших можна віднести природне охолодження ядра планети, локальні критичні варіанти вулканічної активності, що супроводжуються викидами величезної кількості пилу і газів, які перешкоджають проникненню сонячних променів на поверхню планети і сприяють її охолодженню. Або деформація озонового шару і проникнення жорсткого космічного випромінювання на земну поверхню. До штучних факторів можна віднести будь-який техногенний вплив на Природу. Самі техногенні системи також можуть перебувати в нерівноважному стані, але для підтримки нерівноважності їм часто потрібно набагато більше енергії, ніж природним системам для цього [2].

Ми будемо розглядати поверхню нашої планети як глобальну екосистему, умовно розділивши її на розташований на ній неорганічний метало-металоїдний світ, і світ біологічного різноманіття, що включає саму людину і все, що пов'язано з її існуванням. В енергетичному аспекті таку систему слід розглядати як стаціонарну, термодинамічно нерівноважну, яка має два джерела енергії – сонячне випромінювання і внутрішнє тепло планети. Обидва цих енергетичних потоки J_1 і J_2 для нашої системи ми будемо приймати як стаціонарні, зустрічні та не рівні нулю.

Термодинамічні сили, які є джерелами цих потоків, в даному випадку існують як енергетичний потенціал випромінювання Стефана-Больцмана $X_1 \sim (\frac{0,01}{T^4})$ від Сонця та тепловий градієнт Фур'є $X_2 \sim (\frac{1}{T})$ від ядра планети, спряжені таким чином, що виконується умова Л. Онзагера щодо утворення ентропії в слабко нерівноважних системах, де $\sigma = \sum_{\gamma} X_{\gamma} J_{\gamma}$. При цьому кожний γ – збурюючий потік є функцією термодинамічної сили, що викликає його за допомогою феноменологічних коефіцієнтів $L_{\gamma j}$; таким чином, що $J_{\gamma} = \sum_j L_{\gamma j} X_j$, де j – об'єкт застосування дії потоку J_{γ} . Звернемося до умов обґрунтованості лінійних феноменологічних співвідношень. Загальне виробництво ентропії в стаціонарній лінійній слабко-нерівноважній системі визначається як $\sigma = \sum_{j\gamma} L_{j\gamma} X_j X_{\gamma} > 0$. Такий аналіз застосовний там, де в системі відбувається спонтанний перехід від стану сильної нерівноважності до рівноважного стану.

Показником прояву термодинамічної нерівноважності в екологічних системах є зміна градієнта термодинамічного (за І. Пригожиним, хімічного) потенціалу $\delta\mu$, що визначає напрямок вектора зміни ентропії δS в системі. У цьому випадку теорему Пригожина для визначення зміни ентропії в системі за деяким переліком збурюючих факторів (γ) можна представити у вигляді $(\pm)\Delta S = \sum_{\gamma} [\sigma_{\gamma}(\Delta\tau) - J_{\gamma}\nabla\mu]\Delta$, де: ΔS – вектор и зміни ентропії у певному часовому вимірі $\Delta\tau$; $\sigma_{\gamma}(\Delta\tau) = \sigma/\tau$ – внутрішня швидкість виробництва ентропії по γ – порушення в часовому інтервалі $\Delta\tau$; J_{γ} – зовнішній потік речовини або енергії по γ – возмущению; $\nabla\mu = (\frac{\delta\mu}{\Delta x}, \frac{\delta\mu}{\Delta y}, \frac{\delta\mu}{\Delta z})$ – градієнт термодинамічного (хімічного) потенціалу.

Важливим у наших розрахунках є зміна ентропії, яка стосується інформаційних систем, включаючи стільниковий зв'язок та інтернет, нейронні мережі та розвинуті системи штучного інтелекту. Тут за основу прийнято формулу Шеннона $H(x) = -\sum_{i=1}^n (P_i \log_2 P_i)$ – як середню ентропію події (bit), тобто кількість інформації, що приходить на подію (x). Співвідношення між енергетичною та інформаційною ентропією береться з умови $S = k_b \cdot H(x) = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot H(x)$, при цьому $1 \text{ bit} = 9,57 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/К}$.

Що стосується глобальних геологічних, гідро- та атмосферних впливів, а також пов'язаних з ними біологічних систем, основні параметри для аналізу впливу умов термодинамічної нерівноважності отримані розрахунковим шляхом на основі даних досліджень українських вчених Белявцева Р.Ю. (2012, 2016), Кутаса Р.І. (1978),

Лебедева Т.С. (1980), Трипільського А.А. (2004), Гордієнко В.В. (2013), а також джерел World Bank, Global Infrastructure - (2017); U.S. Energy Information Administration (EIA-2021); World Energy Statistics (EIA-2022); NASA Earth Observatory. Earth's Energy Budget; IPCC - Climate Change - (2021); NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), World Meteorological Organization (WMO-2022); N-Habitat-2016; Urbanization and Development: Emerging Futures, (FAO-2020); Land Use in Agriculture ICMM-2020; Mining Contribution to Land Use. Температурні параметри в термодинамічних розрахунках вибиралися оцінково, на основі температурних градієнтів для області впливу тієї чи іншої події, за результатами обробки більш ніж 30 сучасних літературних джерел, а також за даними NOAA, WMO, NASA Earth Observatory, EIA за різні роки спостережень, включаючи розрахункові дані. Зведені дані для аналізу представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Зведені дані показників для розрахунку зміни ентропії в нерівноважних системах на поверхні планети.

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Сукупні витрати енергії на будівництво будівель та утримання промислової та сільськогосподарської інфраструктури.	$5 \cdot 10^{23}$ Дж	Втрати енергії з Світового океану в атмосферу*.	$1,26 \cdot 10^{23}$ Дж/год
Витрати енергії на будівництво доріг та інших транспортних систем	$10^{12} \div 10^{14}$ Дж/км	Втрати енергії від техногенної діяльності людини	$4,2 \cdot 10^{20}$ Дж/год
Сумарні витрати енергії на створення інфраструктури з початку XX століття.	$10^{21} \div 10^{22}$ Дж	Розрахункове значення енергії, що випромінюється Землею в космічний простір	$2,39 \cdot 10^{17}$ Дж/год
Витрати енергії на утримання глобальних комп'ютерних серверних центрів	$2 \cdot 10^{18}$ Дж/год	Загальна енергія біомаси у перерахунку на вуглець*	$9,35 \cdot 10^{21}$ Дж.
Сукупні енерговитрати на створення глобального інформаційного простору	$3,3 \cdot 10^{20}$ Дж	Середньорічна температура та її діапазон на поверхні Землі	288K (185÷ 331K)
Витрати на енергію для підтримки всього Інтернету, включаючи обробку, зберігання та передачу даних	$1,4 \cdot 10^{19}$ Дж/год	Середньорічна температура і її діапазон по всьому Світовому океану	276,5K (275÷ 303K)
Витрати енергії на обслуговування всіх інженерних мереж, що знаходяться в суспільному користуванні.	$6 \cdot 10^{20}$ Дж/год	Середньорічна температура за об'ємом атмосфери та її діапазон	288K (213÷ +329K)

Сукупні витрати енергії на створення всього штучного середовища на Землі, починаючи з древніх індустриальних епох і до наших днів.	$1,6 \cdot 10^{24}$ Дж	Поверхня планети, що вкрита стільниковою мережею	$1,4 \cdot 10^{17}$ м ²
Енергетичні витрати на переробку всіх накопичених промислових і побутових відходів.	$(6 \div 8) \cdot 10^{20}$ Дж	Умовна площа поверхні планети з доступом до Інтернету	$3,7 \cdot 10^{16}$ м ²
Енергія, що виділяється землетрусами на суші і в море.*	$6 \cdot 10^{19}$ Дж/год	Умовна площа міст і населених пунктів	$3,5 \cdot 10^{15}$ м ²
Энергия, высвобождаемая в результате вулканических извержений.*	$1,5 \cdot (10^{18} \div 10^{19})$ Дж/год	Территории ріллі та земельних угодій	$5 \cdot 10^{16}$ м ²
Енергія, що виділяється найбільшими цунамі.*	$7,7 \cdot (10^{15} \div 10^{16})$ Дж/год	Площа, зайнята відкритими шахтами і кар'єрами	$5 \cdot 10^{14}$ м ²
Енергія, що виділяється при атмосферних явищах (грози, смерчі, циклони, урагани).*	$2,5 \cdot 10^{21}$ Дж/год	Площа промислових і побутових техногенних скупчень	$2 \cdot 10^{14}$ м ²
Потери энергии от суши в атмосферу Земли.*	$3,3 \cdot 10^{21}$ Дж/год	Площа суші на земній поверхні	$1,48 \cdot 10^{17}$ м ²

*)опосередкована оцінка

Розрахункові значення відносних значень зміщення вектору зміни ентропії $(\pm)\Delta S$ щодо сумарного виробництва ентропії σ при зовнішньому потоці що збурює речовину J або енергію представлені на рис. 1.

Розрахункам підлягали 62 з історично відомих станів окремих органічних і неорганічних екосистем з найбільш значними енергетичними впливами на планету, зокрема:

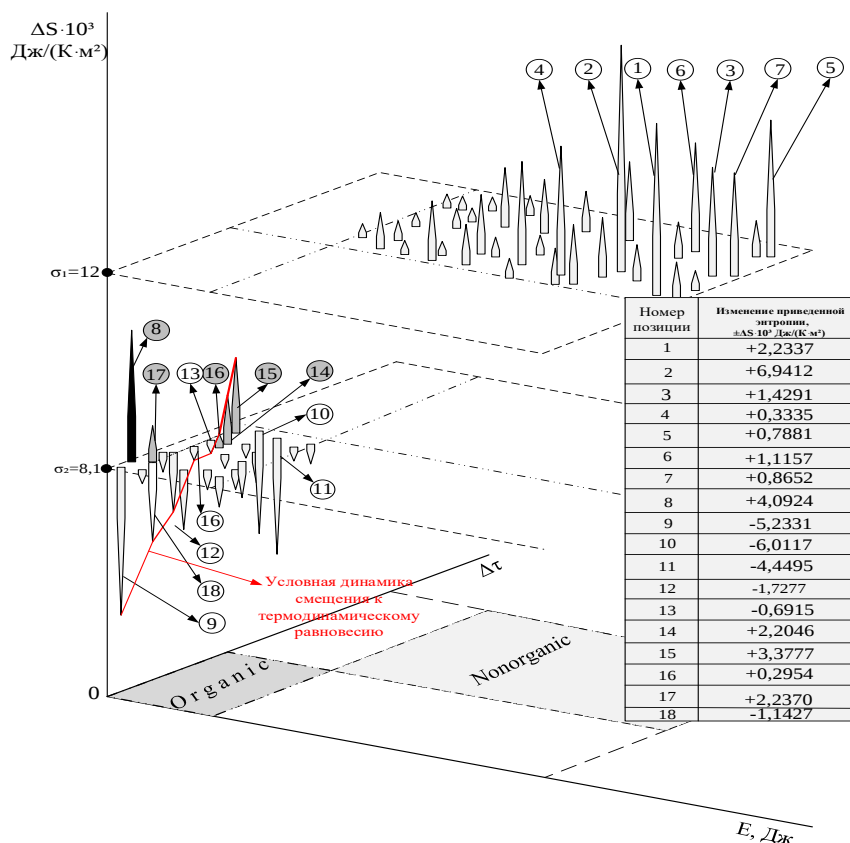


Рисунок 1 – Результаты параметричного розрахунку термодинамічної нерівноважності стану деяких екосистем на Землі. (позначення в тексті). Темні знаки позначають явища, пов'язані з діяльністю людини в напрямку термодинамічної рівноваги.

1. Обрані варіанти для аналізу.

Великий чилійський землетрус магнітудою 9,5 за Ріхтером. 1960. Оцінка енергетичного втручання $1,4 \cdot 10^{19}$ Дж -(поз.1). Виверження вулкана Тамбора. 1815. Орієнтовна вивільнена енергія $1,4 \cdot 10^{18}$ Дж (рік без літа) – (поз.2). Виверження вулкана Тоба (Індонезія). 74000 років тому. Енергетична інтервенція $6,0 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз.3). Цунамі в Індійському океані 26.12.2004. Орієнтовна енергетична інтервенція $1,0 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз.4). Ураган «Патріція», 2015 р. Розрахункова відпущена енергія $1,5 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз.5). Тайфун ТИП. 1979. Оціночне енергетичне втручання $1,0 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз.6). Суперциклон Одіша. 1999. Оціночна енергетична інтервенція $2,4 \cdot 10^{17}$ Дж – (поз.7). Випробування "Цар-бомби" в СРСР. 1974. Розрахункова виділена енергія $2,1 \cdot 10^{17}$ Дж – (поз.8). Синергія від сукупності техногенних об'єктів на планеті: розрахункова витрачена енергія - $1,6 \cdot 10^{23}$ Дж - (поз. 9). Проект перекидання вод з центрального і південного Китаю в північні провінції. Розрахункова енергетична потужність проекту $8,4 \cdot 10^{16}$ Дж (поз.10). Витрати на енергію проекту гідроелектростанції «Три ущелини» в Китаї становлять $1,2 \cdot 10^{20}$ Дж, з річною потужністю $7,09 \cdot 10^{17}$ Дж/рік (поз.

11). Енергетичний обмін (виробництво і передача, в тому числі синергія) в загальній біомасі планети в перерахунку на вуглець, $9,35 \cdot 10^{21}$ Дж - (поз. 12). Зменшення біорізноманіття з вини людини, в перерахунку на вуглець – $1,1 \cdot 10^{15}$ Дж – (поз. 13). Розрахункові енергетичні втручання, необхідні для переробки всіх накопичених промислових і побутових відходів - $(6 \div 8) \cdot 10^{20}$ Дж - (поз.14). Споживання невідновлюваних ресурсів. Орієнтовна вивільнена енергія $(3 \div 4) \cdot 10^{22}$ Дж (поз.15). Оцінено енергетичний вплив промислових викидів в атмосферу і гідросферу $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^{20}$ Дж - (поз.16). Сукупні енергетичні витрати на створення глобального інформаційного простору $3,3 \cdot 10^{20}$ Дж/рік – (поз.17). Витрати енергії на підтримання ГП $1,4 \cdot 10^{19}$ Дж/рік – (поз.18).

2. Для неорганічного світу. Як правило, природні процеси, джерелом яких є потужні сили всередині планети, пов'язані з термодинамічною нерівноважністю. Вони прагнуть привести систему в певний стан, близький до рівноваги. Механізмами такого процесу є, наприклад, зрушення тектонічних плит і пов'язані з ними землетруси, вулканічна активність, а також урагани, циклони, цунамі і подібні явища (поз. 1-7, рис. 1). Такі системи мають позитивно спрямовану зміну ентропії, зведену в область впливу в розрахунковому діапазоні від $+0,3 \cdot 10^3$ Дж/(К · м²) до $+6,9 \cdot 10^3$ Дж/(К · м²), а іноді й більше, при внутрішньому виробництві ентропії для таких систем $\sigma_1 = 12 \cdot 10^3$ Дж/(К · м²). Практично всі природні процеси в неорганічному світі спрямовані в бік зростання ентропії в процесі реалізації конкретного явища і тяжіють до тимчасового, за масштабами зовнішнього енергетичного впливу, рівноважного стану, тривалість яких порівнюють з геологічними, гідрогеологічними або атмосферними процесами.

3. Для органічного світу.

3.1. Біологічні системи, як правило, розташовані далеко від стану термодинамічної рівноважності і прагнуть до максимально можливо термодинамічної нерівноважності. Це, перш за все, все, що пов'язано з фотосинтезом, появою і розвитком різноманітності вуглецево-білкової маси (п. 12, рис. 1). Людина внесла свою лепту в цей термодинамічний дисбаланс, створивши власну інфраструктуру - міста, села, сільськогосподарські системи різного роду, величезну кількість мереж зв'язку - залізничної та автомобільної, інформаційно-комунікативної (поз. 9, рис. 1). У кожній такій системі завдяки людській праці локалізується певна вільна енергія, якій людина знаходить застосування у вигляді нових матеріалів, будівель, машин, енергії комунікації для самих різних цілей, в тому числі нових джерел енергії, яких раніше в природі не існувало. Тому стан термодинамічної нерівноважності є надзвичайно

актуальним як для вуглецево-білкового світу, так і для самої людини. З більш пізніх робіт І. Пригожина, І. Стінгерса, М. Мойсеева випливає, що показником термодинамічної нерівноважності для таких систем, а значить і можливостей для розвитку, є мінімізація їх ентропії. Тому боротьба за термодинамічну нерівноважність в природі - це не тільки змагання за локалізацію і збереження енергії на планеті, а й змагання в напрямку розвитку і переважання необхідних для цього систем. Зменшення наведеної ентропії для таких екосистем знаходиться в межах $\Delta S_i = (-0,69 \div -6,0) \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$, що можна порівняти як з величиною внутрішнього виробництва ентропії для них $\sigma_1 = 8,1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$, так і з показниками зростання ентропії для неорганічних систем. Тобто білково-вуглецеві екосистеми більш спрямовані до максимального порушення термодинамічної рівноважності, ніж неорганічні екосистеми, і людина тут відіграє важливу роль на планеті.

3.2. Зокрема, можна констатувати, що в процесі антропогенезу людина сформувалася, перш за все, як ще один механізм збереження сонячної енергії на планеті [3]. Цю місію вона здійснювала завдяки своїй виробничій діяльності в найбільш різноманітних формах її прояву. Як правило, результатом ставали синергетичні зміни в речовинах, у природному середовищі, що оточує людину. Як «концентратор» сонячної енергії людина не могла не вступити в конкуренцію з природою за термодинамічно нерівноважні стани створених ним систем.

3.3. Першим сигналом для дисипативних процесів стало забруднення навколишнього середовища, яке поступово набуло незворотного характеру, не підвладного природним механізмам утилізації. Маються на увазі промислові та побутові відходи (п. 14, рис. 1), забруднення атмосфери і водного басейну (п. 16, рис. 1). прояв технологічної інерції в самій діяльності людини [6], зменшення біорізноманіття у вуглецево-білковому світі (поз. 13, рис. 1) тощо. Зростання ентропії, викликане діяльністю людини, поступово перевищує енергетичні можливості екосистем щодо відновлення і підтримання нерівноважних станів. Тому конкуренція за термодинамічний дисбаланс повинна лежати в основі біологічного життя взагалі і для людини зокрема.

4. Глобальний інформаційний простір як користувач термодинамічної нерівноважності. Ще однією несподіваною і часто недооціненою причиною спостережуваного зсуву процесів, пов'язаних з утриманням людського суспільства від стану термодинамічної нерівноважності, може бути поступове формування потужної інформаційної оболонки планети (натепер, мережа з майже 800 локальних і

національних операторів і близько 8 млн базових станцій стільникового зв'язку, які надають послуги зв'язку і доступ до мережі Інтернет в окремих країнах і регіонах - охоплюють 95% населення планети [4]) і прагнення розвивати штучний інтелект як метало-металоїдну альтернативу біологічним системам (поз. 17 і 18, рис. 1). Для неї, несподівано, зростання ентропії, що складається з втрат енергії при створенні мережі і її інформаційної складової, по відношенню до суб'єкта впливу – людині стає різко позитивним $\Delta S_{17} = +2,23 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$, Незважаючи на те, що робота таких систем в розрахунковому варіанті для територій зі стійким інформаційним покриттям для мережі Інтернет супроводжується синергетичними ефектами зі зниженням загальної ентропії на $\Delta S_{18} = -1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$.

5. Інтерпретація. Пояснення цьому видно з наступного. Об'єктивність, що доступна людині, завжди знаходиться в межах досяжності його органів почуттів (зору, дотику, слуху і т. д.). Розум і знання дають людині уявлення про величезну кількість предметів і явищ, які знаходяться за межами його органів почуттів, але мають реальний сенс без специфічної вербалізації. У цьому контексті глобальний інформаційний простір відіграє дуже унікальну роль у системі «людина-машина». Вона дозволила зробити віртуальність реальністю і розкріпачити наявну об'єктивність, раніше недосяжну для людини.

Глобальна інформація, як все більш самостійний суб'єкт, для якої людина може стати можливим об'єктом застосування, дозволила об'єктивізувати неймовірно велику кількість людських відчуттів, зробити світ ближче до органів її почуттів. Це безумовний позитив. Для теми даної роботи негативним є те, що синергетичним початком в даному процесі виступає не людина, а створена ним об'єктивна реальність – глобальний інформаційний простір і, зокрема, штучний інтелект, що генерується в його надрах і який вже здатний перехопити ініціативу щодо розвитку термодинамічної нерівноважності і мінімізації ентропії в таких системах без ініціативи самої людини. Вперше умовна система «людина-машина» зіткнулася з обов'язковим збільшенням ентропії і перетином її до термодинамічної рівноваги в порівнянні з вже існуючою даністю, що сама ж і створила. Важливим тут є зміна місця людини в причинно-наслідкових відносинах в системі «людина-машина». Від суб'єктності до об'єктності.

Якщо брати людину як суб'єкта інформаційних систем, то системні процеси впорядкування інформації призводять до зниження інформаційної ентропії, відповідно: штучний інтелект (ШІ) – на 15-20%; Інтернет речей (IoT) – на 7-10%; Big Data - на 10-15%, тренувальні мережі типу DL або RL - на 20-25%, забезпечуючи

загальне зниження ентропії на $4,4 \div 6,1$ Дж/К. При цьому інформаційна система прагне до максимальної термодинамічної нерівноважності.

Але якщо прийняти людину як об'єкт впливу глобального інформаційного простору, то ті ж самі системні процеси призводять до неупорядкованості інформації. Вони сприяють зменшенню структуризації і зростанню невизначеності ГІП для людини як об'єкта впливу, підвищують ентропію людино-машинних систем, роблячи її порівнянною зі зростанням ентропії для багатьох природних явищ, а також зі зменшенням ентропії, характерної для біологічних систем, в тому числі і людини. При цьому інформаційна система, включаючи людину і, зокрема, її AI, прагне до мінімальної термодинамічної нерівноважності.

Сучасні моделі ГІП в якості об'єкта зниження ентропії передбачають дії людини щодо оптимізації алгоритмів передачі даних, форм когнітивної аналітики та розробки методів штучного інтелекту, наприклад, для раннього виявлення актуальних збоїв і загроз.

Фактично для людини захист від об'єктності на користь суб'єктності стає домінуючим у конкуренції між AI та людиною. В її основі лежить теза: «ми поки ще не знаємо, як змусити найдосконаліші системи штучного інтелекту поводитися так, як ми хочемо». Відсутність вирішення цих та інших подібних проблем для людини означає небезпеку втрати претензій на частину термодинамічного нерівноважності в природі на користь глобальних інформаційних систем, у тому числі зі штучним інтелектом.

Висновок

Людина вже давно почала програвати конкуренцію за термодинамічну нерівноважність в природі через низку факторів, пов'язаних з антропогенним впливом, а саме: зростання ентропії в техногенних системах, повільні темпи відновлення природних екосистем, виснаження невідновлюваних ресурсів, скорочення біорізноманіття. Виникнення глобального інформаційного простору зажадало перегляду ролі і функцій людини в таких системах, коли пріоритети в управлінні переходять від людини до суб'єкта з невичерпною інформацією, обсяги якої роблять їх незрівнянними з людським мозком навіть з урахуванням органів чуття і пізнання останньої. Людина починає поступатися своєю позицією суб'єктності і швидкості обробки інформації перед способами перерахування варіантів, характерних для штучних носіїв інформації – комп'ютерних мереж і штучного інтелекту. Відповідним чином, нові системи здатні самотійно трансформувати стани термодинамічної

нерівноважності в напрямку від людини до власних метало-металоїдних систем з низьким рівнем ентропії, мінімізуючи відомі дисипативні процеси в людино-машинних системах.

Література

- 1.Lasaga, A. C. (1981). Transition State Theory. Reviews of Geophysics. 1981. № 19(2), - P. 201–232.
2. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Вид. СПД Самченко. Маріуполь-Київ, 2024. 630 с.
- 3.Волошин В. С. Щодо питання про місце людини на Землі. Варіант дослідження. XIX міжнародна конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення». 2023. Харків. С.118-130
- 4.Report of the International Telecommunication Union on information and communication technologies statistics : note / by the Secretary-General. 2024. <https://digitallibrary.un.org/record/515803?ln=ru&v=pdf>.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Азархов О. Ю., д-р. мед. наук, доц.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ПЕРЕХІДНІ ЕНТРОПІЙНІ ПРОЦЕСИ НА МЕЖІ ВЛАСТИВОСТЕЙ У ДЕЯКИХ ЕКОСИСТЕМАХ

У літературі накопичено багатий досвід теоретичних досліджень в області співіснування живої і неживої матерії в межах таких частин екосистеми, як «людина-машина» або «технічна система-навколишнє середовище». Це й теорія дисипативних структур І. Пригожина [1], згідно з якою живі системи використовують термодинамічно нерівноважні стани для створення порядку шляхом взаємодії з штучним неорганічним середовищем (наприклад, фотосинтез або сонячні батареї). Концепція ексергії І. Дінцера [2] відображає однофункціональне перетворення енергії, з тією різницею, що здатна оптимізувати ексергію для зростання, а машина, як неорганічна система оптимізує ексергію для рівноваги (система мозок проти ШІ). Теорія симбіогенезу Л. Маргуліса [3], у прикладі до системи «людина-машина» опосередковано пов'язана з темою пограниччя, підкреслюючи, що його властивості і синергізм виникають в результаті співпраці органічного і неорганічного.

Розглядаючи прикордонну зону між органічними і штучними неорганічними середовищами в таких частинах екосистеми, як «людина-машина», або «технічна система-навколишнє середовище» ми будемо називати їх «прикордонною системою або *Edge System* - *ES*». А двома її складовими вважатимемо підсистеми «*InOrg*» і «*Org*», що означає «*InOrganic*» і «*Organic*». Це легко записати у вигляді пояснювальної формули ($ES = IO + O$). До найбільш поширених типів граничних частин *ES*-екосистем відносяться:

- мозок людини та штучний інтелект (ШІ);
- людина-технологічний процес;
- фотосинтез і неорганічні джерела енергії;
- урбосистема та навколишнє природне середовище;
- співвідношення ентропії в живому і неорганічному середовищі;

Деякі узагальнені характеристики властивостей таких систем надані в таблиці

1.

Таблиця 1 – Деякі узагальнені якості вуглецево-білкового і штучного неорганічного частин у співвідношенні до ES-екосистеми.

Якісна характеристика частин екосистеми	Вуглецево-білковий світ, людина	Штучний неорганічний світ (техн. система)
Структура	Самоорганізована, ієрархічна	Кристалічна, аморфна, статична
Енергія	Хімічна (АТФ, глюкоза)	Електрична, механічна, тепла та ін.
Ентропія	Зниження локальної за рахунок зовнішньої	Зростання загальної, як результат дисипації
Адаптація	Висока (еволюція, навчання)	Низка (фіксована конструкція)
Швидкість процесів	Повільна, біологічна	Швидка, фізична
Довголіття	Обмежена (старіння)	Висока (стійкість матеріалів)

Підсистеми «Org» і «InOrg», що нас цікавлять, виявляють властивості як антагоністичного, так і неантагоністичного характеру. До перших відносяться:

- ентропійні властивості, коли біологічні системи чинять опір зростанню ентропії, а неорганічні системи її підвищують;
- адаптивні властивості, гнучкі для органічних і жорсткі для штучних неорганічних;
- відносно високі швидкості для фізичних процесів в штучному неорганічному світі і низькі швидкості, наприклад, для біопроцесів в органічному світі.

До неантагоністичних властивостей можна віднести функціональність і схожість виконуваних завдань, що, власне, і є предметом нашого дослідження, здатність до порівнянних перетворень енергії, стійкість в підтримці системи.

Область взаємного проникнення в прикордонну зону і пов'язаний з нею коефіцієнт μ показують ту частину простору ES-екосистеми, до якої відносяться ті чи інші специфічні якості означених частин цієї системи і загальні для них властивості самої системи. Значення μ для кожного з них буде істотно відрізнятися і показувати ступінь впливу однієї частини на іншу і взаємно. Наприклад, «урбосистема-навколишнє середовище» - це область взаємного проникнення фауни і флори на територію міста, з одного боку, і заміські культурні насадження, дачні ділянки, системи електропередачі, сміттєзвалища, з іншого. Для системи «мозок-штучний інтелект» така межа більше спрямована на впровадження людського мозку в створювані ним системи штучного інтелекту, ніж навпаки, наприклад, нейроінтерфейси, такі як

Neuralink, Synchron, NeuroPace тощо. Тим не менш, зворотна реалізація властивості ШІ в людському мозку, судячи з усього, є питанням часу, враховуючи розробку вбудованих чіпів, потреби мозку в такій же швидкості дій, як і у комп'ютерних системах [4].

У даній роботі ми розглянемо, як змінюється ентропія досліджуваних систем на межі їх взаємодії в залежності від ступеня умовного взаємного проникнення μ . Розрахункова динаміка змін ентропії для таких об'єктів, як *ES*-системи, дуже специфічна і вимагає певного аналізу в зв'язку з низькою уніфікацією об'єктів аналізу. Наведемо низку прикладів.

ES-екосистему, що включає урбосистему, як представника «*InOrg*» і навколишній біологічний світ природи, віднесений до «*Org*», слід розглядати як систему з можливістю імпорту з навколишнього середовища низькоентропійних ресурсів, таких як енергія, товари і сировина, а також експорту високоентропійних ресурсів у вигляді відходів, тепла і забруднення. Це відповідає концепції дисипативних систем, де внутрішній порядок підтримується за рахунок наростаючого безладу в надсистемі. Така система відноситься до термодинамічно відкритих, в яких підсистема «*Org*» слабо нерівноважна або навіть рівноважна, а підсистема «*InOrg*» позиціонується як термодинамічно сильно нерівноважна.

Результати дослідження деяких термодинамічних параметрів, що зв'язують області *ES*-екосистеми з її синергетичними властивостями, представлені на рис. 1.

Як і очікувалося, підсистема «*Org*» має більш низькі значення ентропії. Вона включає в себе також мінливі умови теплового режиму поблизу від насичених теплом урбосистем, вихідні температурні параметри від яких дуже залежить органіка, зокрема, кліматичні ефекти, біогеохімічні цикли. Для підсистеми «*Org*» передбачувана ентропія складається з: $S_{Org} \approx +(0,226 \div 0,461) \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$ для екосистем, таких як листяні ліси, річки та озера; $S_{Org} \approx -0,422 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$ - для замських пасовищ, де обмінні процеси більш складні.

Використовуючи розраховані дані, покажемо, що щорічна зміна ентропії $\Delta S_{NonOrg} \approx +1,25 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{К}$ або $\approx +3,42 \cdot 10^{11} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} \approx +0,0198 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$ і показує на деградацію граничної області *ES*-екосистеми. В цілому ми бачимо стрибок ентропії на кордоні *ES*-екосистеми (див. рис. 1). Урбосистема, яка готова до збільшення організованості, пригнічує навколишнє середовище, яке в свою чергу здійснює спротив особистій дезорганізації. Можливий варіант, коли внутрішня ентропія урбосистеми

стає негативною або близькою до нуля, оскільки місто підтримує власний порядок за рахунок імпорту ресурсів.

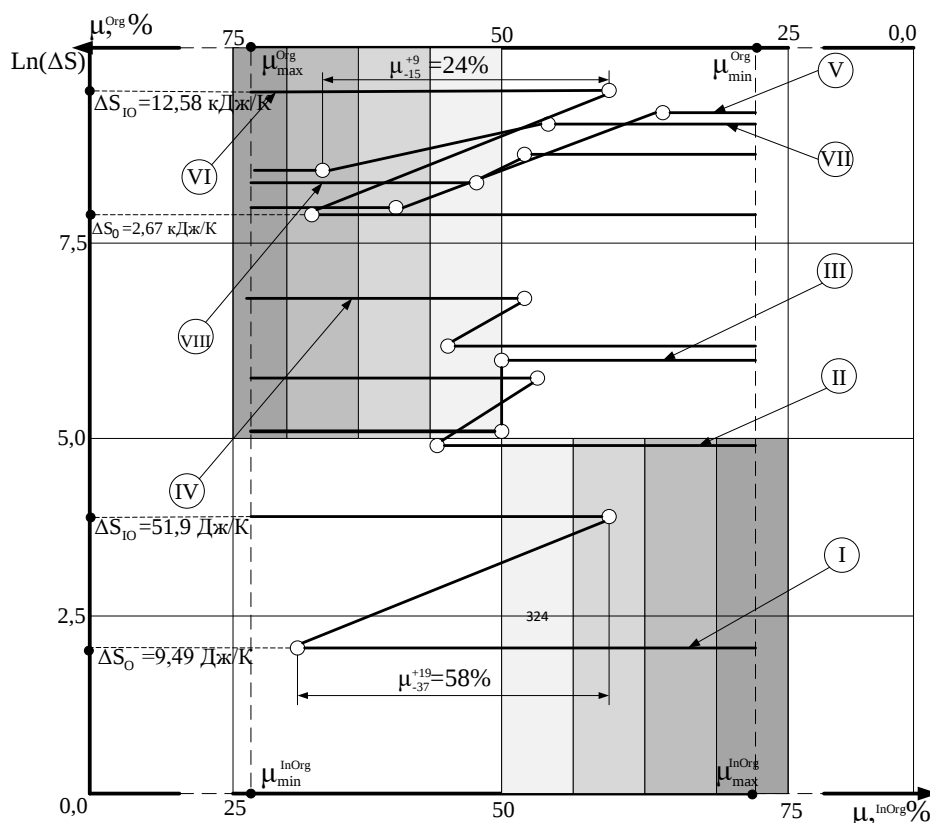


Рисунок 1 – Межі зміни ентропії в деяких частинах ES-екосистемах в залежності від параметра μ . (Тут ентропія, що записана через натуральний логарифм, вимірюється в Дж/К.)

Ще одна специфічна структурна частина ES-екосистеми, яка описує граничну область, це та, в якій співіснують системні якості людського мозку і штучного інтелекту. Вона несе в собі якості мінливої термодинамічної ентропії (ΔS), та визначається через енергію, яка споживається як мозком, так і технічними системами, що забезпечують функціонування штучного інтелекту, відповідно, та описує дві підсистеми «Org» і «InOrg» виходячи з їх функціонального призначення [5].

У самому приблизному вигляді розрахунки підтверджують, що для 86 мільярдів нейронів в мозку людини при споживанні близько 20 Вт зовнішньої енергії відбувається збільшення ентропії $\Delta S_{Org} = +5,6 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} = +64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$, а інформаційна ентропія мозку при швидкості обробки даних 10^{15} операцій в секунду $H_{Org} = +0,8 \cdot 10^9$ бит або $+0,76 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} = +6,910^{-20} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$. Для технічної системи, що забезпечує роботу штучного інтелекту (задана потужність 100-1000 Вт) з розмірністю 32 біта, в залежності від обсягу (10^9 параметрів), а також структури даних і використовуваних алгоритмів,

опосередковані дані мають такий вигляд: $\Delta S_{InOrg} = +7,8 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{длбу}} = +9,02 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$, тобто на порядки вище, а інформаційна ентропія при швидкості обробки інформації 10^{17} операцій в секунду $H_{InOrg} = +32 \cdot 10^9 \text{ біт}$ або $+30,6 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} = 3,5 \cdot 10^{-18} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$.

Перехідний характер зміни ентропії в таких складових ES-екосистеми очевидний, а сама перехідна функція може бути не тільки гладкою, але навіть бінарною, що відображає невизначеність в ES-екосистемі при такому перехідному процесі. Слід зазначити, що процедури вивчення ентропії для ES-екосистем дуже складні, і в кожному варіанті досліджуваних їх частин вимагає свого персонального підходу. Тим не менш, такі розрахунки можна привести до засвоюваного результату, який дозволить ефективно проаналізувати ці дані.

На рис. 1 показані інші області для μ , де мають вигоди специфічні властивості деяких структурних складових ES-екосистеми, що описані в табл. 2 і складаються з двох підсистем: «InOrg» і «Org». Перетин ентропії при переходах в області ES-екосистеми може відбуватися як поступово – від «InOrg» до «Org», так і навпаки, від «Org» до «InOrg» і по низхідній, в тому ж порядку

Таблиця 2 – Перехідні процеси в змінах ентропії на межі органічних і неорганічних складових у ES-екосистемі.

№№ п/п	Частини ES-екосистеми: «Org» «InOrg»	Діапазон зміни ентропії, Дж/(кгК)	Діапазон зміни коефіці- єнта μ , %	Вектор направлення зміни ентропії	
				Зріст ент- ропії ES- системи	Зменшення зросту ΔS
I	«О» - мозок; «ІО» - штучний інтелект.	9,49÷51,9	$\mu_{-37}^{+19} = 56$	-	+
II	«О» -біолог. тканина «ІО»- імпланти	141,2÷361,4	$\mu_{-5,5}^{+3} = 8,5$	-	+
III	Біомінералізація «О» - біолог. тканина «ІО» - мінерали	165,7÷518,0	$\mu_{-0}^{+0} \approx 0$	+	-
IV	«О» - ензими «ІО»-каталізатори	601,8÷1043,1	$\mu_{-5,2}^{+3,0} = 8,2$	-	+
V	«О»-біоенергія «ІО»-штучна енергія	3294÷8955	$\mu_{-9}^{+13,5} = 22,5$	+	-
VI	«О»-навк.прир.серед. «ІО»- урбосистема	2670÷12580	$\mu_{-15}^{+9} = 24$	-	+
VII	«О»-біомембрана «ІО»-фільтр	4023÷9996	$\mu_{-14}^{+4} = 18$	+	-
VIII	Нановироби «О»-орган.компон. «ІО»-неорг. компонент.	3133÷4675	$\mu_{-2,5}^{+2,1} = 4,6$	+	-

Це по різному може характеризувати кожну з таких частин *ES*-екосистеми. Наприклад, частини *ES*-екосистеми «мозок-штучний інтелект» характеризується низхідним вектором стрибка зміни ентропії в бік підсистеми «*Org*», в якій підсистема «*InOrg*» схильна до великих змін ентропії ($\Delta S_{InOrg} = +51,9 \text{ Дж}/(\text{кгK})$), як менш організована, ніж мозок ($\Delta S_{Org} = +9,49 \text{ Дж}/(\text{кгK})$).

Цим пояснюються, зокрема, сучасні переваги мозку в когнитивності перед системами штучного інтелекту, а також завдяки високій адаптації, самовідтворенню та гомеостазу [4]. Тобто в *ES*-системі очевидні переваги органічного над неорганічним.

Розглянуті таким же чином частини *ES*-екосистеми, позначені на рис.1 як II, III, IV, показують такі ж самі результати. Їх відмінною рисою є те, що в ній бере участь людина, як підсистема «*Org*», на відміну від *ES*-систем, де участь людини або опосередкована, або має іншу органічну складову (поз. V, VI, VII, VIII на рис. 1).

Для деяких *ES*-систем можуть спостерігатися взаємно протилежні тенденції. Наприклад, для складової *ES*-екосистеми - «нанотехнології», переважне зростання ентропії стосується до неорганічної складовій «*InOrg*» ($\Delta S = +4447 \text{ Дж}/(\text{кгK})$), а її органічна складова показує на спрямованість до відносно більшої організованості, що має вираз у мінімізації зростання її ентропії ($\Delta S = +3294 \text{ Дж}/(\text{кгK})$). Слід відмітити, що, як правило, погранична ентропія з боку штучного неорганічного середовища суттєво перебільшує такий показник для органічного середовища (табл. 1). І це також є причиною сильної нерівноважності для всієї *ES*-екосистеми, як джерелом її якості, так і умовою для її розвитку.

Більш того, як показують графіки I, II, IV, VI, в разі активної участі людини в таких системах їх стан стає явно більш стійким, а термодинамічно нерівноважна структурна складова *ES*-екосистеми прагне до впорядкованості і підлягає відповідним дослідженням. В інших випадках, для *ES*-екосистеми в цілому характерне зростання інтегральної ентропії або прагнення до термодинамічної рівноважності.

Ми маємо справу з деякою новою якістю *ES*-екосистем, яка не описана в доступній літературі. Ентропійні перехідні процеси в певному розрізі живого та неживого можуть вказувати на певні зміни в стійкості *ES*-екосистеми, її відношенні до термодинамічної рівноважності, спрямованості деяких процесів. Вони можуть бути пов'язані з якісними змінами співвідношення «*Org*» та «*InOrg*» в області фізичного або інформаційного розділу. Можливо, ця якість носить системний характер. У цьому випадку особливості або закономірності *ES*-екосистеми можуть стати джерелом нових знань про природу людської діяльності, яка сама, будучи похідною від біологічного

світу, створила свій специфічний неорганічний світ, який здатний конкурувати, і вже конкурує, з біологічним світом, здатний співіснувати з ним, в залежності від таких унікальних властивостей, що знаходяться на кордоні цих двох світів.

До наступних синергетичних властивостей, що пов'язані з окремими складовими в структурі *ES*-екосистеми для відомих органічних і штучних неорганічних кластерів, що взаємодіють, можна віднести наступні:

- підвищена механічна міцність на межі органічних і штучних неорганічних матеріалів, наприклад, кісткових з'єднань у вигляді композиту органічного колагену (гнучкість) і неорганічного гідроксиапатиту (твердість) [6], що тримають перехідний процес між ентропійними станами в такій *ES*-системі в розмірі не менш $-0,34 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ в напрямку зниження ентропії [7];

- нові властивості органічних напівпровідників (*OSs*), що утворюють чисті інтерфейси з металами та діелектриками, органічних світлодіодів (*OLed*) та фотоелектричних елементів (*OPV*) з інжекцією та розділенням заряду [6];

- каталітична активність на межі розділу «*InOrg*» і «*Org*», наприклад, платина і ліганди надає більш високої селективності і стабільності каталізаторів, коли при гетерогенному каталізі органічні молекули модифікують поверхню неорганічного каталізатора, даючи підвищену реакційну здатність. Експериментально підтверджена амплітуда перехідного процесу, пов'язана зі станом ентропії на кордоні *EC* - система «ліганд-платина» досить висока в діапазоні $+(1682.1 \div 3045.6) \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$. У відповідності до інших експериментальних даних [8], такий стрибок ентропії на межі двох вказаних підсистем складає $-3471 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

- властивості *ES*-систем, пов'язаних з акумулюванням та перетворенням енергії, наприклад, перовскітні сонячні елементи ABX_3 (*A*-органічний катіон; *B* -метал; X_3 -аніонний галоген) підвищують ефективність поглинання світла і перенесення заряду, тим самим сприяючи виникненню нової цікавої синергетичної якості. За аналітичними даними [3, 5] перехідний процес на межі «*Org*» і «*InOrg*» складає $-420,3 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, що не перевищує 40% від первинного значення ентропії.

Далеко не для всіх перерахованих вище властивостей можна знайти опубліковані дані про встановлені перехідні процеси для ентропії на кордоні «*InOrg*» і «*Org*» в якості аргументу на користь ефекту *ES*-системи в зв'язку зі складністю відповідних досліджень. Як правило, цьому повинні передувати реальні експерименти. Тим не менш, системні властивості *ES*-екосистеми що знаходяться на межі двох

підсистем «*InOrg*» і «*Org*», у багатьох випадках підтверджуються і мають право на існування.

Література

1. Prigogine I., Stengers I. *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. London: Heinemann, 349 p.
2. Dincer I. Rosen M. A. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 576 p.
3. Margulis L. *Symbiosis in Cell Evolution*. 2nd ed. New York: W.H. Freeman, 1993. 452 p.
4. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Людина чи машина: інтелект та міцність, перспективи та конкуренція. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Т.14. №1, 2024.
5. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Конкуренція та перспективи білково-вуглецевих та специфічних неорганічних екосистем на Землі. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2024. Вип. 48. Сер. Технічні науки. С. 111-120.
6. Chun-Yen Lin, Chao-Hsien Hsu, Chieh-Ming Hung, et. Entropy-driven charge-transfer complexation yields thermally activated delayed fluorescence and highly efficient OLEDs. *Nature Chemistry* V. 16, 2024. P. 98–106.
7. Katsanos A., Kapolos J. Time distribution of adsorption entropy of gases on heterogeneous surfaces by reversed-flow gas chromatography. *Journal of Chromatography A*. Vol. 1127, Issues 1-2. 2006. P. 221-227
8. Estejab A., García Cárcamo R., Getman R. B. Influence of an electrified interface on the entropy and energy of solvation of methanol oxidation intermediates on platinum (111) under explicit solvation. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 2022. P. 274-285.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Азархов О. Ю., д-р. мед. наук, доц.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ПРО ОДИН ПОРІВНЯЛЬНИЙ КРИТЕРІЙ ПО ВІДНОШЕННЮ ДО КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ДЕЯКИХ ПРИРОДНИХ ТА ШТУЧНИХ ЕКОСИСТЕМ

Предметом нашого дослідження є системи, параметричний аналіз яких може дати відповіді на деякі питання релевантних відносин і які мають деякі ключові порівняльні функції. Це, для порівняння: мурашині колонії, людське суспільство і створені ним неорганічні системи штучного інтелекту

Відомо, що час є одним з основних факторів еволюційного розвитку в природі. На рисунку 1 показані основні часові інтервали, протягом яких розвивалися досліджувані системи. Людський мозок оволодів дещо іншим механізмом прискореної еволюції, ніж інші біологічні системи як самоорганізована система пізнавальної діяльності. Це дозволило людині досягти дивовижних результатів за набагато коротший еволюційний період, яких ніколи не досягали інші біологічні популяції на планеті.

Формування «колективного розуму» у мурах було пов'язане з розвитком феромонної інформації в ранньому крейдянському періоді, а спеціалізація в професіях - з початком так званої еусоціальності. Професійні спеціалізації в мурашиній колонії є способом децентралізованого життєзабезпечення. До такого результату (*децентралізованого управління*) людина прийшла лише через 2 мільйони років свого існування в XXI столітті, створивши так звані технології «blockchain» з розподіленими реєстрами і, об'єктивно, без централізованого управління.

У людини подібні етапи зародження розуму пов'язані зі збільшенням обсягу мозкової речовини і розвитком когнітивізму, а досягнення в спеціалізації прийшли мало не з появою перших міських цивілізацій, надлишком продовольства з землеробства і тваринництва. Розвиток тваринництва було пов'язано з взаємовигідними відносинами з іншими тваринами і комахами. Розвиток рослинництва пов'язаний з мінімізацією збиральництва і пошуком інших шляхів отримання їжі. Однак факт залишається

фактом: ще за 100 мільйонів років до появи людини на поверхні нашої планети з'явилися зачатки землеробства і тваринництва. Це були мурашині колонії, які знаходили способи існування не тільки в збиранні, але і в штучних біологічних технологіях.

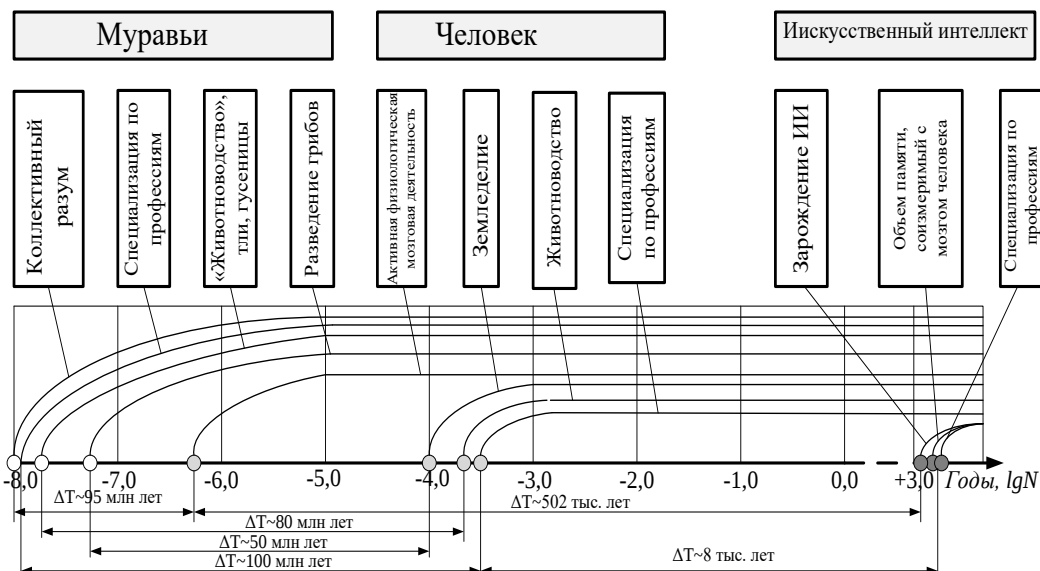


Рисунок 1 – Позначення на часовій шкалі основних порівнянних еволюційних етапів у розвитку популяцій мурах, людини та штучного інтелекту.

Дуже короткий, але інтенсивний період розвитку штучного інтелекту дозволяє виділити в їх часових інтервалах порівняння лише двох його складових: ємність генеративної пам'яті машини і людини, і виникнення замісних (для людини) спеціалізацій. Якщо потужність активних нейронів мозку дорівнює байтам $2,5 \cdot 10^{15}$, то порівнянна потужність суперкомп'ютера **Frontier** (США) - $1,1 \cdot 10^{15}$ байт. Ази виробничої спеціалізації людина отримала близько 4,5 тисяч років тому (всього 10-15 тисяч професій), а ШІ лише пару десятиліть тому (дані класифікації O*NEET, США), але вже в кількості 470 видів професій.

В якості ще одного показника, який може характеризувати дві розглянуті популяції, а також штучний інтелект, ми будемо використовувати такий узагальнюючий параметр, як зміна (збільшення) ентропії в досліджуваних системах. Це показник ступеня деградації або розвитку, це порівнянний рівень організації досліджуваних систем. Порівняння двох чисто біологічних систем, а особливо з неорганічною системою (штучним інтелектом), яка бурхливо розвивається, може бути дуже повчальним для людини.

Термодинамічна складова такої ентропії дає уявлення про можливий розподіл енергії в системі, а її інформаційна компонента оцінює невизначеність або обсяг інформації, пов'язаної зі станами мурашиних суперколоній. За точку відліку візьмемо термодинамічний стан колективної області – суперколонію мурах, яка розташована на європейському узбережжі Середземного моря (Італія, Франція, Іспанія).

Термодинамічні характеристики мурашиної колонії можна розрахувати двома способами. Якщо розглядати мурашину колонію як систему теплообміну, де джерелами тепла є нескінченна кількість самих мурах, а також сонячне світло, вентиляційні та утеплювальні системи, то зміна ентропії розраховується відповідно до другого закону термодинаміки $\Delta S = \Delta E / T$, где $\Delta E = 5 \cdot 10^{-28}$ Дж/особь [1]; $T = 291\text{K}$ – температура в колонії. Тоді зміна термодинамічної ентропії в суперколонії з 10^9 особин за часовий інтервал в одну секунду складе $\Delta S = \frac{5 \cdot 10^{-28} \cdot 10^9}{291} = 1,695 \cdot 10^{-21}$ Дж/(К · с).

Існує і другий, альтернативний, метод розрахунку, який передбачає взяття за основу хаотичні механізми руху кожного індивіда в повному обсязі. У класичному випадку для термодинамічної ентропії використовується наступний вираз: $\Delta S = k_b \ln(\Omega)$, де Ω — кількість можливих мікростанів в залежності від чисельності мурах, їх розподілу по території і їх взаємодій (наприклад, форми контактів, генерація феромонів), типу взаємодії (по «професіям»); $k_b = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К – константа Больцмана.

Параметрами для розрахунку зміни термодинамічної ентропії в даному випадку є:

- опосередкована температура в мурашнику; $T = 295\text{K}$
- температура навколишнього середовища; $T = 291\text{K}$
- кількість мурах $N = 10^9$;
- площа колонії; $F = 6000 \text{ км}^2$
- енергія взаємодії мурах за допомогою феромонів, при русі, а також витрата енергії на підтримку активності, температури тіла, температури гнізда $E = 5 \cdot 10^{-28}$ Дж/особь [1];

- прийняті професії та види взаємодії: фуражири (0,45), солдати (0,15), годувальники (0,115), няні (0,11), будівельники (0,072), санітари (0,04), розвідники (0,035), пастухи (0,03), переробники відходів (0,015)

Скористаємося розрахунковою моделлю [2], яка описує число можливих мікростанів в залежності від енергії взаємодії E_i , площі i – того ареалу F_i і числа мурах в i – ому ареалі N_i

$$\Omega \approx \sum \frac{F_i N_i}{E_i} = k_{\text{cp}} \sum \frac{N_i^2}{E_i},$$

де k_{cp} – опосередкований коефіцієнт щільності особин, які обслуговують i -ю зону F_i

Розрахунок зміни ентропії зводиться до визначення параметра Ω і отриманні значення ΔS , зведеного до одиниці часу (1 с). Для популяції мурах в заданому розмірі розрахункове значення для порівняння $\Delta S = 1,202 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$.

Цікаво порівняти термодинамічну ентропію людського мозку ($6,4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$), розрахованої на основі [3] і популяції з $3,44 \cdot 10^5$ мурах, сумарний нейронний мозок яких за кількістю нейронів приблизно відповідає мозку однієї людини. головного мозку людини. Припустимо, що в даній популяції зберігається така ж ступінь спеціалізації. Тоді для мурах цифра розрахункового приросту ентропії становила $\Delta S = 0,92 \cdot 10^{-21} \cdot \text{с}$), що на порядки нижче, ніж для аналогізованого таким чином людського мозку.

Мурашині поселення характеризуються дуже дбайливим ставленням до наявного тепла. Його зберігають для підтримки оптимальної температури (18°C) заради личинкам, попелиці, одомашненим гусеницям, грибкам. Зокрема, тепловтрати в суперколонії мурах чисельністю $1 \cdot 10^9$ особин за рахунок вентиляційних каналів в кількості 120 од / га і з середнім діаметром $\sim 0,06$ м складають $1,27 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}/\text{сут}$ [1], що відповідає зміні ентропії $\Delta S \approx 4,35 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$. Для порівняння, втрати тепла від розподілу енергії для потреб міста з населенням 1 млн осіб і площею 700 км^2 (без урахування промислової складової) перевищують $5,18 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{сут}$, що відповідає зростанню ентропії $\Delta S \approx 0,0198 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$. Різниця в термодинамічній ефективності вимірюється десятками порядків.

Мозок людини – це компактна нейронна система з відносно низьким енергоспоживанням (20 Вт), на відміну від розподіленого колективного мозку мурахів, кожна умовна клітина якого потребує на порядки менше енергії внаслідок синергетичних ефектів і поступається людському мозку за функціональністю.

У свою чергу, штучна нейронна мережа, заданої розмірності і в залежності від обсягу параметрів, а також структури даних і використовуваних алгоритмів, як носій штучного інтелекту, у вигляді неорганічної системи, вимагає величезних, в порівнянні з мозком людини або мурашки, енергетичних витрат (умовно більш $1,0 \text{ кВт}$). І, як будь-

яка штучна неорганічна система, створена людиною, вона запрограмована на значні великі втрати енергії і зростання ентропії в опосередкованих розмірах $\Delta S \approx 9,2 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$. Зведені дані цього та аналогічних розрахунків наведені в таблиці 1, де можна буде оцінити ефективність такого показника, як ентропія системи як критерій організації та можливості розвитку розглянутих біологічних і неорганічних систем.

Таким чином, індекс термодинамічної ентропії в ретроспективі розвитку показує значні відмінності між тим, що людина створила за останні 40 тисяч років свого існування на основі неорганічних систем (міста, машини, підприємства, комунікації, мережі) і організованим біологічним світом, який був створений і вдосконалений нашими двійниками – мурашиними колоніями – протягом 100 мільйонів років. Тією мірою, якою їх некогнітивний «колективний розум» дозволяє їм це робити.

Інформаційна ентропія - це друга частина системи оцінки взаємодій всередині мурашиної суперколонії, яка відповідає за впорядкованість і ступінь її організації. Для розрахунку інформаційної ентропії ми будемо враховувати такі параметри:

- *потік* інформації, що передається між мурахами в суперколоніях, наприклад, за допомогою феромонів, сигналів про пошук їжі, захисту і т.д.;

- *невизначеність стану*: невизначеність або випадковість, з якою кожна мураха виконує своє завдання, що збільшує ступінь ентропії;

- *обсяг переданої інформації*: це кількість інформації, необхідної для опису стану системи (наприклад, місцезнаходження мурах, їх поведінки і т.д.).

Інформаційна ентропія обчислюється за формулою Шеннона $H = - \sum p_i \log(p_i)$, де p_i — ймовірність того, що система знаходиться в стані i . Для суперколонії мурах ці ймовірності можуть означати, що мураха знаходиться в певному місці або виконує конкретне професійне завдання.

Розрахунок зводиться до обчислення зміни ентропії на мурашку за одиницю часу: $H \approx 1,999 \text{ біт/с.}$ або $\approx 0,019 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$. Для заявленої популяції в 1 мільярд мурах інтегральна інформаційна ентропія може становити $H_{total} = 1,9 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$.

Таблиця 1 – Порівняльні дані про зміну ентропії для деяких органічних і неорганічних систем

№№ п/п	Назва системи		Зміна ентропії, Дж/(К·с)	
			Термодинамічної	інформаційної
1	Мурашина популяція	$N = 10^9$	$1,202 \cdot 10^{-21}$	$1,9 \cdot 10^{-14}$
		$N = 3,44 \cdot 10^5$	$0,92 \cdot 10^{-21}$	$1,9 \cdot 10^{-14}$
2	Людський мозок		$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,91 \cdot 10^{-20}$

3	Урбосистема с $N = 1 \cdot 10^6$ мешканців	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-17}$
4	Система штучного інтелекту	9,2	$3,5 \cdot 10^{-18}$

Таким чином, в термодинамічному плані, і в ретроспективі 100 мільйонів років існування, колонії мурах термодинамічно набагато більш організовані, ніж більшість з того, що створила людина, включаючи його самого за 2 мільйони років існування. Зростання термодинамічної ентропії у відомих суперколоніях мурах на кілька порядків нижче, ніж зростання цієї ж ентропії в системах, створених людиною, включаючи її мозок (див. таблицю 1).

Інші результати є в області інформаційної ентропії. Тут переваги людини і всього доступного, що вони створили, на кілька порядків вище, ніж у мурашиних популяцій з їх стомільйонною історією, що очевидно. Це пов'язано з тим, що людський мозок в силу своєї когнітивності створює величезну палітру потреб і одягає їх у все зростаючі інформаційні потоки (потреби в якості життя, способи досягнення, результати, втрати, відповідність запрограмованим і т. д.), які до недавнього минулого оброблялися сумірними можливостями самого мозку і паперових носіїв, а пізніше і за допомогою комп'ютерної техніки, величезних за швидкістю обробки можливостей. А остання є штучно створеними людиною неорганічними системами. В результаті більш ефективним стає умовний «мозок» людини, який сам по собі є унікальним інформаційним інструментарієм, ефективність якого на багато порядків перевищує все, що існує в біологічному світі. Це підтверджується мінімізацією зміни інформаційної ентропії для таких систем (див. таблицю 1).

Мурашині колонії зі своїм «колективним мозком», на відміну від людей і систем штучного інтелекту, мають набагато менший набір інформаційних інструментів. Це

- тактильні органи чуття, їх у них не більше $6,5 \cdot 10^{-15}$ Дж/((К·с) інформаційних ентропійних витрат;
- феромонні залози, з їх $3,1 \cdot 10^{-14}$ Дж/((К·с) інформаційних ентропійних витрат;
- мінімальний набір потреб - харчування і біологічна підтримка, розмноження, безпека, що корелює з $1,8 \cdot 10^{-14}$ Дж/((К·с) інформаційного ентропійного навантаження. навантаження.

Подібний мінімум споживаної інформації для мурашиних колоній робить їх уразливими за багатьма показниками життєздатності, на відміну від людини.

Можна зробити висновок, що інформаційна складова на рівнях організації людського суспільства, в тому числі і тих штучних інформаційних систем, які вже

створена людиною, є можливим напрямком, в якому людина спроможна послідовно перевершити найбільш організовані біологічні системи, навіть незважаючи на те, що багатомільйонний досвід еволюції деяких з цих систем дозволяє розглядати їх ближче до оптимальних, у порівнянні з творіннями рук людських. У розвитку інформаційної складової людського буття вбачається перспектива її розвитку як симбіозу органічної та неорганічної речовини.

Повертаючись тепер до рис. 1, можна сформулювати логічне припущення, що якщо штучний інтелект завдяки своєму необмеженому кількісному інформаційному ресурсу досягне здатності оволодівати однією і тією ж унікальною властивістю – когнітивними взаємодіями, то швидкість його розвитку буде непорівнянною навіть у порівнянні з темпами розвитку людства. І наслідки такого еволюційного руху в значно коротші проміжки часу матимуть уже не характер еволюційного, а революційного розвитку, відкриваючи нові можливості для неорганічного світу, якщо продовжувати порівнювати його зі світом біологічного життя.

Відкритим залишається питання: чи зможуть системи штучного інтелекту, що володіють необмеженим інформаційним ресурсом і здатністю здійснювати найпростішу логічну екстраполяцію, оволодіти когнітивними механізмами пізнання і оцінки природної сутності, як це робить людина.

Висновки

1. Запропонований показник ефективності, а саме зміна (зростання) ентропії, який може бути використаний для порівняння багатьох біологічних популяцій та окремих неорганічних систем на планеті, дозволяє розглядати такі системи дещо по-іншому, наприклад, з точки зору їх існування, співіснування та конкуренції.

2. Термодинамічна складова цього показника дозволяє судити про ті природні ресурси, які не використовуються людиною, і прикладом для яких є біологічні системи мурах або інші органічні системи.

3. Інформаційна складова ентропії на рівнях організації людського суспільства, в тому числі і тих інформаційних систем, які вже створила людина, є можливим напрямком, в якому він зможе послідовно перевершити найбільш організовані біологічні системи, незважаючи на те, що багатомільйонний досвід еволюції цих систем дозволяє розглядати їх ближче до оптимальних в порівнянні з творіннями рук людини.

4. Людина не може не погодитися з тим, що тільки відсутність когнітивного компонента в системах штучного інтелекту обмежує його розвиток, темпи якого і зараз перевищують темпи розвитку будь-яких інших біологічних систем на планеті.

Література

1. Hölldobler B., Wilson E. O. The Superorganism: The Beauty, Elegance, and Strangeness of Insect Societies. W.W. Norton & Company New-York, 2009. P. 103–120.
2. Gordon, D. M. Ant Encounters: Interaction Networks and Colony Behavior. Front Cover. Princeton University Press, 2010. 152 p.
3. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Чому людина починає програвати конкуренцію за термодинамічну нерівноважність, як фактор розвитку в навколишньому техногенному середовищі. Вісник Приазовського державного технічного університету Серія: Технічні науки Вип. 49. Т. 2, 2024. С. 86-93.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ІНВЕРТНІ МЕХАНІЗМИ МІНІМІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ТЕПЛОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Інвертування теплової енергії означає перетворення тепла на інші форми енергії або використання роботи для перенесення тепла проти природного температурного градієнта. Це одна з унікальних форм перетворення енергії з менш якісних видів у якісніші її види. І, можливо, найбільш радикальний із усіх способів мінімізації теплових відходів для цілого ряду технологічних процесів.

В більшості технологічних процесів тепло розсіюється як втрата (відхід). Однак якщо це тепло знаходиться при температурі вище навколишньої, воно може бути частково повернуто через спеціальні інвертні технології, зокрема, термоелектричні перетворення або зворотні цикли Карно.

Термоелектричні генератори використовують ефект Зеебека: $V = S(T_{hot} - T_{cold})$. ККД термоелектричного генератора $\eta = \frac{(T_{hot} - T_{cold})}{T_{hot}} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+T_{cold}/T_{hot}}$, де: Z - добротність матеріалу, $T = \frac{1}{2}(T_{hot} + T_{cold})$. Дуже специфічний показник для термоелектричного перетворення теплової енергії, що називається фігурою досягнення [1] $ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k}$, де: S - коефіцієнт Зеебека, σ - електропровідність, k - теплопровідність, T - температура. Він свідчить про ефективність термоелектричного методу до переробки неповоротної теплової енергії. Чим вища електропровідність і чим нижча теплопровідність такої системи, тим вища її ефективність.

У холодильних інвертерних системах для опису процесів охолодження використовуються закономірності циклу Карно $COP_{Carn} = \frac{T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}}$ [2]. Зокрема, для термоелектричних охолоджувачів: $COP = \frac{\alpha T_{cold} I - 0,5 I^2 R}{I^2 R + k(T_{hot} - T_{cold})}$.

Деякі способи інвертних перетворень тепловий енергії в більш якісну, наприклад, електричну або ін. енергію представлені у табл. 1.

Таблиця 1 – Приклади інвертних процесів перетворення енергії, застосовні в технологічних процесах

Процес	Опис	Квантовий аспект
Термоелектричний ефект	Перетворення тепла на електрику	Квантова інтерференція у наноструктурах
Холодильник	Перенесення тепла за допомогою роботи	Немає прямого квантового ефекту
Фотосинтез	Перетворення світла у хімічну енергію	Квантові переходи у молекулах
Ядерна реакція	Перетворення маси в енергію	Квантові тунельні ефекти

Інвертування тепловий енергії через термоелектричний ефект дає унікальну для практики можливість перетворення промислового тепла в якісну електричну енергію. У квантових системах, таких як наночастинки, ефективність таких процесів може бути підвищена за рахунок квантового обмеження (див. нижче). Наприклад, термоелектричні генератори в космічних місіях, що перетворюють тепло від радіоактивного розпаду в електрику.

Інвертування тепла через холодильні системи, що працюють за зворотним принципом Карно де робота використовується для перенесення тепла проти природного градієнта також дозволяє локалізувати найменш якісну теплову енергію в низькотемпературну середу.

Фотосинтез, як спосіб перетворення світлової енергії в хімічну, з накопиченням її в молекулярних зв'язках рослин, також можна віднести до інвертних перетворень, які вже сьогодні використовуються в практичній діяльності людини.

Відомий спосіб ядерних перетворень (реакцій), коли маса перетворюється на кінетичну енергію продуктів поділу, яка потім перетворюється на тепло ядерного реактора, що характеризує його як інвертний спосіб перетворення енергії.

Нижче представимо низку прикладів, що демонструють різноманітність підходів до інвертування тепловий енергії, її локалізації та перетворення на більш якісні форми енергії за допомогою термоелектричних ефектів з погляду ентропійних ефектів. Уздовж лінійки - від використання фазово-змінюючих наноматеріалів та нових оксидів до інтеграції термоелектричних систем з електролізом, ці рішення передбачають інноваційні шляхи для підвищення енергоефективності та екологічності систем, що мінімізують теплові відходи.

Термоелектричний генератор з фазово-змінними матеріалами (ФММ) використовують для утилізації тепла, що відходить з вихлопних газів двигуна внутрішнього згоряння. Система включає теплообмінник, з'єднаний з циклом Ранкіна,

який перетворює тепло на пару робочої рідини та пристрій перетворення енергії, що використовує ефект Зеебека для вироблення електрики.

Для розрахунку розглянемо термоелектричний генератор з плавким буфером на парафіні ($T_{fus} \approx 328 \text{ K}$), що працює в діапазоні температур між джерелом тепла (373 K) та радіатором (298 K). Розрахунок зміни ентропії включає вклад від тепла, підведеного к фазовому матеріалу, ентропійний відвід з теплом радіатора та незворотними втратами в обсязі $E_{loss} = 200 \text{ Дж}$ становитиме $\Delta S = \Delta S_{in} - \Delta S_{out} + \Delta S_{loss} = 9,15 - 9,56 + 0,671 = 0,26 \text{ Дж/К}$. Це показує близькість системи до термодинамічного балансу.

Перетворення тепловий енергії в хімічну або електрохімічну, це ще один технологічних спосіб мінімізувати теплові відходи для багатьох виробництв. Наприклад, пряма система з термоелектричними ефектами та електролізом представляє комбінацію термоелектричного перетворення з виробництвом водню і виглядає як нетривіальний підхід, що розширює можливості для використання теплової енергії, що втрачається, включаючи її перетворення на хімічну форму. Тепло використовується для генерації електрики (через термоелектричний елемент). Ця електрика не подається до зовнішньої мережі, а прямує на електроліз води, перетворюючи енергію в хімічну форму (водень та кисень). Система діє як тепловий накопичувач енергії у вигляді водню.

Розрахунок зводиться до визначення хімічної ентропії продуктів електролізу $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$. Суммарная энтропия системы $\Delta S_{total} = \Delta S_0 + \Delta S_{out} + \Delta S_{ctem} = \frac{Q_0}{T_n} + \left(-\frac{Q_{out}}{T_c}\right) + n \cdot \Delta S_{rxn} = -16,34 \text{ Дж/К}$. Це не суперечить другому закону термодинаміки, оскільки система не замкнута, продукти - кисень і водень забирають вільну енергію та ентропію, якщо водень у технологічному процесі не спалюється назад, то збільшується ентропія навколишнього середовища.

Радикальні методи перетворення тепла на корисну роботу для холодильних машин та теплових насосів включають магнітну рефрижерацію, що використовує магнітокалоричний ефект, термоакустичну рефрижерацію, засновану на звукових хвилях, та вдосконалені абсорбційні системи, що використовують тепло, що відходить.

Магнітна рефрижерація як спосіб локалізації теплової енергії [3], є радикальним завдяки відсутності холодоагентів та використання магнітних полів, що робить їх екологічно чистими та енергоефективними.

Вихідні дані для розрахунку: наведена вхідна енергія (робота на намагнічування): $E_0 = 500$ Дж; корисне охолодження (тепловий потік, що відводиться від холодного резервуара): $E_{cold} = 120$ Дж; ефективність системи (коефіцієнт продуктивності): $\eta = 0,15 \Rightarrow W = 75$ Дж; температура холодного кінця: $T_{cold} = 280$ К; температура гарячого кінця $T_{hot} = 300$ К. Розрахункове значення зміни ентропії системи $\Delta S = \Delta S_{cold} + \Delta S_{hot} = \frac{E_{cold}}{T_{cold}} + \frac{E_0 - W - E_{cold}}{T_{hot}} = -0,429 + 1,017 = 0,588$ Дж/К.

Термоакустична рефрижерація передбачає радикальний підхід до питання локалізації теплової енергії за рахунок використання акустичної енергії , що усуває необхідність у компресорах. У термоакустичній рефрижерації використовує стоячі акустичні хвилі для створення температурного градієнта дозволяє переносити тепло без механічних компресорів [4]. Система працює за зворотним циклом Стірлінга. Перевага цього способу - можливість роботи на відхідному теплі, як і у випадку з [5] , коли у пристрої використовується тепло вихлопних газів автомобіля для приводу термоакустичного холодильника.

Вихідні дані: наведена вхідна енергія: $Q_0 = 1000$ Дж; вихідний тепловий потік, що відводиться від холодного кінця: $Q_{cold} = 300$ Дж; корисна робота (ефективність системи): $\eta = 0,1 = \frac{W}{Q_0}$; $W = 100$ Дж; температура гарячого кінця: $T_{hot} = 320$ К ; температура холодного кінця: $T_{cold} = 280$ К. Розрахункове значення зміни ентропії для системи становить $\Delta S = \Delta S_{cold} + \Delta S_{hot} = \frac{Q_{cold}}{T_{cold}} + \frac{Q_0 - W - Q_{cold}}{T_{hot}} = -1,071 + 1,875 = 0,804 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Абсорбційна рефрижерація та інші теплоспрямовані системи використовують тепло для приводу абсорбційних або комбінованих циклів, що робить їх радикальними у контексті утилізації відходить тепла [6]. Це тип теплоспрямованої холодильної системи, у якій охолодження досягається за рахунок теплової енергії, а не механічної роботи. Основний принцип заснований на фазових переходах та взаємодії робочого тіла (зазвичай аміак, вода або LiBr) з абсорбентом. Використовуються у вигляді суспензії твердих частинок у рідині, які проходять через сублиматор та сепаратор, створюючи холод.

Для розрахунку обираємо абсорбційну холодильну машину на парі аміак-вода, що працює при використанні тепла від джерела 90°C (363 К), з відведенням тепла на рівні 35°C (308 К), та охолодженням до 5°C (278 К). Вихідні дані для розрахунку: наведена тепла енергія на генератор (тепло від котла): $Q_0 = 2000$ Дж; холод, відведений від охолоджуваного об'єкта (випаровувач): $Q_{cold} = 600$ Дж; корисна

робота (наведена ефективність): $COP = \frac{Q_{cold}}{Q_0} = 0,3$; температура генератора (тепло підводиться) $T_{gen} = 363$ К; конденсатор /абсорбер (тепло скидається) $T_{abs} = 308$ К; випаровувач (охладжувана зона): $T_{cold} = 278$ К.

Ентропія системи змінюється як сума всіх потоків тепла, віднесених до відповідної температури $\Delta S = \Delta S_{gen} + \Delta S_{cold} + \Delta S_{abs} = -600/278 + 2000/365 + (-2600/308) = -5,088$ Дж/К. Враховуючи, що на практиці частина тепла втрачається в навколишнє середовище у вигляді теплових втрат, а також недоураховані флуктуації, слід приймати корекцію зміни ентропії до величини $\Delta S_{correct} = 0,713$ Дж/К у вигляді приросту ентропії при використанні низькопотенційного тепла в умовах термодинамічної незворотності.

Систематизація основних термодинамічних параметрів, що характеризують розглянуті інвертні системи представлена в табл. 2.

Таблиця 2 – Деякі термодинамічні параметри технологічних систем, здатних підвищити якість енергії, що використовується

Найменування технологічного процесу	Вхідна енергія, E_0 , Дж	Корисна робота, W , Дж	Енергетичні втрати, E_{out} , Дж	Зміна ентропії ΔS , Дж/К
Системи магнітної рефрижерації	500	75	120	0,588
Технології термоакустичної рефрижерації	1000	100	300	0,804
Технології абсорбційної рефрижерації	2000	-	600	0,713
Термоелектричний генератор РСМ з термомодулем на основі Bi_2Te_3 .	3000	150	2350	0,359
Термоелектричні генератори з фазово-змінними матеріалами	3000	150	2850	0,26
Перетворення теплової енергії в хімічну чи електрохімічну	10000	600	9400	-16,34

Сформуємо з представлених технологічних процесів перетворення теплової енергії в більш якісні її види та ієрархічний ряд (рис. 1), дослідимо його залежно від

зміни ентропії, як показника організованості або неорганізованості технологічного процесу засвоєння теплової енергії. У цьому випадку мова йдеться про організацію технологічного процесу щодо його теплових втрат або відходів.

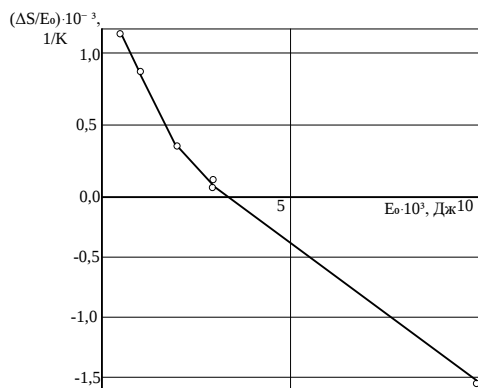


Рисунок 1 – Показник організованості інвертних систем різних типів в залежності від використовуваної зовнішньої енергії E_0 (за даними табл. 2).

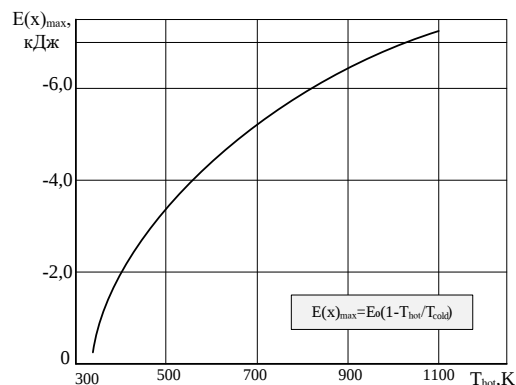


Рисунок 2 – Залежність максимальної ексергії (корисної роботи) високотемпературних джерел теплової енергії

Організованість інвертних систем суттєво залежить від потужності джерела первинної теплової енергії, що підлягає інвертуванню (рис.1). І якщо вона є тепловою втратою в деякому технологічному процесі, то її енергія вище 3 кДж на одиницю перетворення є джерелом синергії ($\Delta S \leq 0$) та дає можливості для ефективних інвертних технологій та зниження теплових втрат.

На рис. 2. представлена характеристика ексергетичної ефективності інверсії теплової енергії від температури її джерела та її фіксованої кількості E_0 . Цей графік візуалізує фундаментальні обмеження та можливості всіх інвертних теплових систем. Він показує, що:

- низькотемпературне тепло (наприклад, 350-400 K) практично марно без термодинамічно досконалих перетворювачів ($\Delta S \approx 1,1 > 0$);
- тепло вище 600–700 K має відносно високу ексергетичну цінність ($\Delta S \approx 0,08 \div 0,13 > 0$);
- системи, такі як термоелектричні генератори, магнітні цикли, абсорбційні установки та термохімічні реактори, можуть бути доцільні тільки за наявності певного температурного напору. Якщо $T_{hot} > 800 K$, система максимально ефективна для інвертування такої теплової енергії ($\Delta S \approx -1,55 < 0$; $E(x)_{max} = 6,0$ кДж). Для порівняльного аналізу розглянутих способів інверсії вхідної теплової енергії на

предмет енергетичної ефективності способів мінімізації теплових відходів у системах, застосуємо метод побудови Sankey -діаграм потоків [7].

Такі діаграми візуалізують переміщення ресурсів (у разі, енергетичних потоків) між різними вузлами. Вузли це джерела, проміжні стадії або користувачі ресурсу. Потоки – це лінії між вузлами, ширина яких позначає об'єм, а потоки можуть ділитися, об'єднуватись або йти від одного вузла до кількох. Sankey -діаграми допомагають зрозуміти, куди йде енергія, скільки губиться і скільки можна рекуперувати. Вони особливо корисні для аналізу енергетичних та ентропійних перетворень у термодинамічних та інженерних системах, дозволяючи наочно відстежити втрати, перетворення та ефективність [8].

Діаграма побудована так, що, відповідно до закону збереження енергії: $E_0 = W_{out} + Q_{out}$, вхідний потік E_0 розбивається на дві гілки - верхню W_{out} : і нижню Q_{out} . Діаграма будується на лінійній алгебри потоків: Певний вектор flows = [+10000, -2000, -8000].

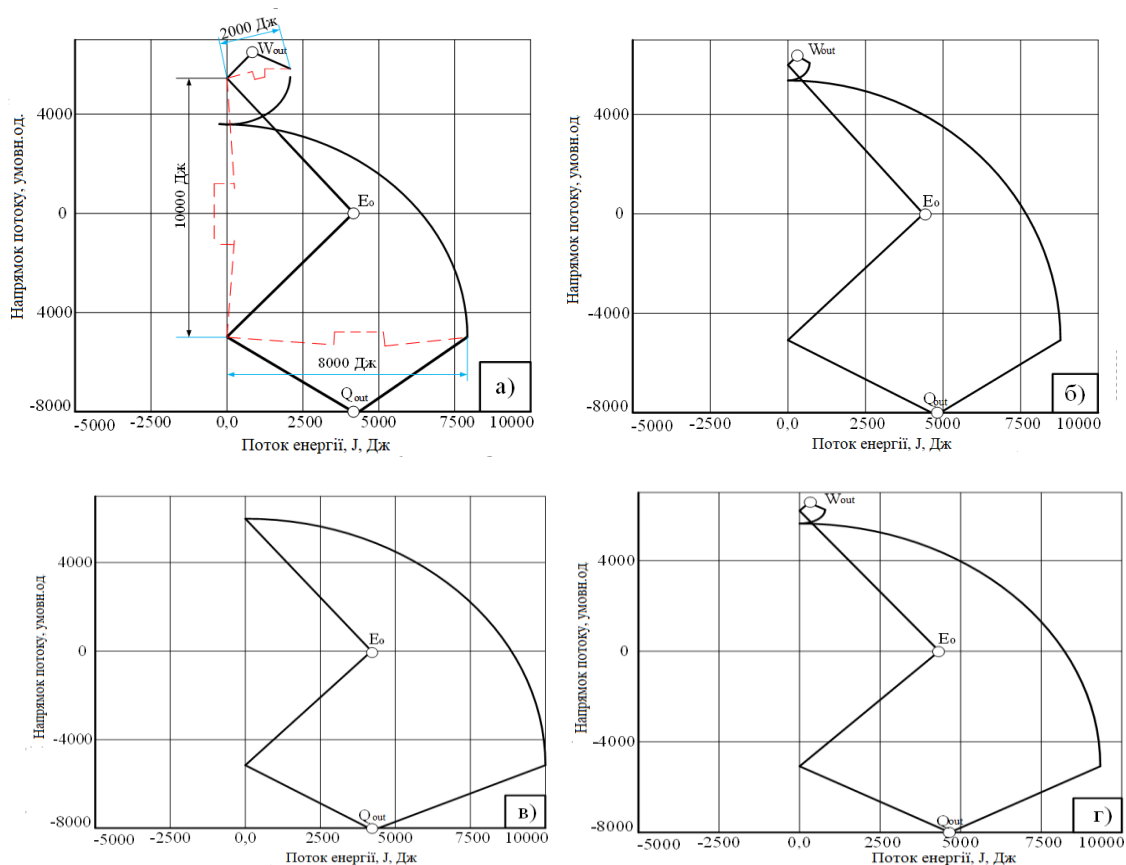


Рисунок 3 – Sankey-діаграми технологічних процесів інвертування теплової енергії послідовно для умов: а) - термоакустичної системи; б) - магнітної рефрижерації; в) - абсорбційної системи; г) - термоелектричної системи з фазово- змінною речовиною

Термоакустичні системи (рис. 3,а) використовують теплову енергію для створення акустичних хвиль (звуку). Графік наочно демонструє, яка частка перетвореної та "втраченої" енергії у технології засвоєння теплової енергії. Як було показано, ця система особливо цікава тим, що не має рухомих частин, а енергія перетворюється завдяки градієнту температури та резонансним коливанням газу в замкнутій камері.

На рис. 3,б представлена діаграма розподілу енергетичних потоків для варіанта магнітної інверсії теплової енергії. Графік відображає процедуру підведення енергії для розподілу у процесі перетворення на корисну роботу (в даному випадку - робота, пов'язана з переміщенням теплового потоку або активацією магнітних властивостей) та залишку тепла, що скидається в навколишнє середовище. При намагнічуванні та розмагнічуванні певних матеріалів (наприклад, гадоліній) виділяється та поглинається тепло. Воно може використовуватися або відводитися. У порівнянні з термоакустикою магнітна система має велику ефективність (30% проти 20%) за рахунок виробництва більшою корисної роботи W_{out} з того ж обсягу вихідної теплової енергії E_0 .

Абсорбційна система (рис. 3,в) охолодження працює за рахунок подачі високотемпературного тепла (наприклад, від згоряння, сонячного колектору або промислового скидання тепла) на генератор. Це тепло використовується для випаровування холодоагенту, який потім абсорбується в іншому контурі, де поглинає тепло (тобто охолоджує). На графіку видно дві зони поділу енергії:

- верхня область (невелика) - корисний ефект (відведення тепла від холодного тіла).
- нижня область (основна) - тепло, що скидається в навколишню середовище після циклу.

Ця система має більше низький ексергетичний вихід (15%) порівняно з магнітною (30%) та термоакустичною (20%) системами, але може використовувати низькопотенційне тепло — у тому числі «безкоштовне» або утилізоване.

Термоелектричні генератори (ТЕГ) перетворюють температурний градієнт безпосередньо в електричну енергію (рис. 3,г). Високий показник ефективності $\eta = W_{out}/E_0 = 6000/15000 = 0.4 = 40\%$, обумовлений тепловою буферизацією фазово-змінними матеріалами, яка знижує втрати. Головною зоною є область теплового потоку, що проходить через фазово- змінний матеріал та термоелектричний модуль. Термоелектрична система з фазово мінливими матеріалами демонструє найбільш

високу ефективність серед розглянутих систем (40%), простоту конструкції (немає рухомих частин), широкі можливості для пасивної утилізації тепла.

З таких досліджень слідує, що термоакустична система найменш «ентропійно навантажена» на одиницю роботи - вона найбільш раціональна з погляду термодинаміки. Магнітна та термоелектрична системи створюють високе ентропійне навантаження на 1 Дж, тобто вимагають сильного градієнта та термодинамічної нерівноважності. Абсорбційна система тут не виробляє роботу, тому пряме порівняння не застосовується - вона перетворює тепло високої якості в холод, а не в механічну роботу.

Література

- 1.Çengel, Y. A., Boles, M. A. Thermodynamics: An Engineering Approach, McGraw-Hill Education, 8th edition, New York, 2015, 1024 p.
- 2.Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics, Wiley, 2016, P. 103–175.
3. Magnetocaloric refrigerator. Патент США US11333414. Заявл.14.11.2016 ; опубл. 17.05.2022; Авторы Vetrovec J., Larkspur C.
- 4.Thermoacoustic Engine. Патент США US9777951B2. Заявл. 30.11.2012; опубл. 03.10.2017. Авторы Shinya Hasegawa, Yasuo Oshinoya, Tsuyoshi Yamaguchi, Tomohiro Kaneko.
- 5.Thermoacoustic refrigeration device of automobile. Патент Китай CN201703227U. Заявл. 17.05.2010; опубл. 17.05.2020.
- 6.Refrigeration system. Патент США US5715702; заявл. 1975. Опубл. 1975. Авторы Alain M. Eid. Источник: US5715702.
- 7.Rosen, M.A., Dincer, I. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Elsevier, 2015.
- 8.Schmidt, M. The Sankey Diagram in Energy and Material Flow Management. Springer, 2008.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ПРО ВИКОНАННЯ СТ. 4 EWS ES В УКРАЇНСЬКОМУ ПРИРОДОЗАХИСНОМУ ЗАКОНОДАВСТВІ. ПРИНЦИПИ КЛАСИФІКАЦІЇ

Основні принципи, що лежать в основі сучасних нормативно-правових актів щодо класифікації промислових відходів, базуються на досвіді та міжнародних стандартах, наукових підходах та вимогах до сталого розвитку. Вони ґрунтуються, перш за все, на розумінні того, що будь-які відходи, так чи інакше, є антагоністичним продуктом людської діяльності для Природи, впоратися з яким самій Природі дуже складно. Такі класифікатори, перш за все, поділяють відходи за ступенем їх небезпеки (екологічний принцип), за походженням і приналежністю до конкретних джерел, за їх агрегатним, фізичним або хімічним станом, за принципами їх обліку, ідентифікації та мінімізації.

Наприклад, основні принципи класифікації промислових відходів, прийняті в Європейському Союзі (European Waste Catalogue - EWS), відомому як LoW (Список відходів, затверджений рішенням Європейської Комісії 200/531/EC) поділяють відходи на небезпечні та безпечні, враховують походження відходів, їх склад та небезпеку, встановлюють *ієрархію поводження з відходами* (Waste Framework Directive 2008/98/EC - Waste Framework Directive, WFD). Першим в ієрархії стоїть *запобігання утворенню відходів*, тобто недопущення появи відходу, як фізичної суттєвості, а вже потім - підготовка до повторного використання, переробки, іншого відновлення, утилізації. Норми передбачають обов'язкову відповідальність виробника. Такі принципи регулюються спеціальним регламентом ES № 1272/2008 (CLP). Закон України «Про управління відходами» (п.1 стаття 4) теж встановлює пріоритетом «запобігання утворенню відходів» поперед інших способів управління відходами.

Але ж, виходячи з досвіду, можна стверджувати, що в Україні дуже мало реальних технологій, які б відповідали вимогам статті 4 EWS ES щодо запобігання утворенню промислових відходів, особливо тих, які характеризуються потужними матеріальними потоками.

Якщо розглядати такі нормативні документи з точки зору мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі, то ці методи легко узгоджуються з міжнародними нормативними документами в тій частині, яка стосується запобігання утворенню відходів (ст. 4, а - запобігання, WFD ES), як пріоритетний підхід, що знаходиться на першому місці в такій ієрархії. Це означає, що перш ніж розглядати будь-які заходи щодо поводження або утилізації відходів, необхідно прагнути до запобігання їх утворенню. Цим методам поводження з відходами присвячено чимало робіт в області реалізації принципу термодинамічної двоєдності як основи походження промислових відходів [1], а створення умов для подолання цього принципу може стати основою для реалізації статті 4,а WDF ES.

В цьому випадку класифікації підлягають не стільки самі відходи, які вже утворилися, здатні забруднювати навколишнє середовище і вимагають переробки, утилізації, скільки компоненти сировини, які є основою тієї чи іншої технології і з яких можна отримати потенційні відходи.

На рис. 1 запропоновано функціональну схему, що відображає основні принципи такої поведінки з промисловими відходами в їх структурній ієрархії та в залежності від основних природно-наукових законів та закономірностей, що лежать в основі походження та подальшого існування відходу.

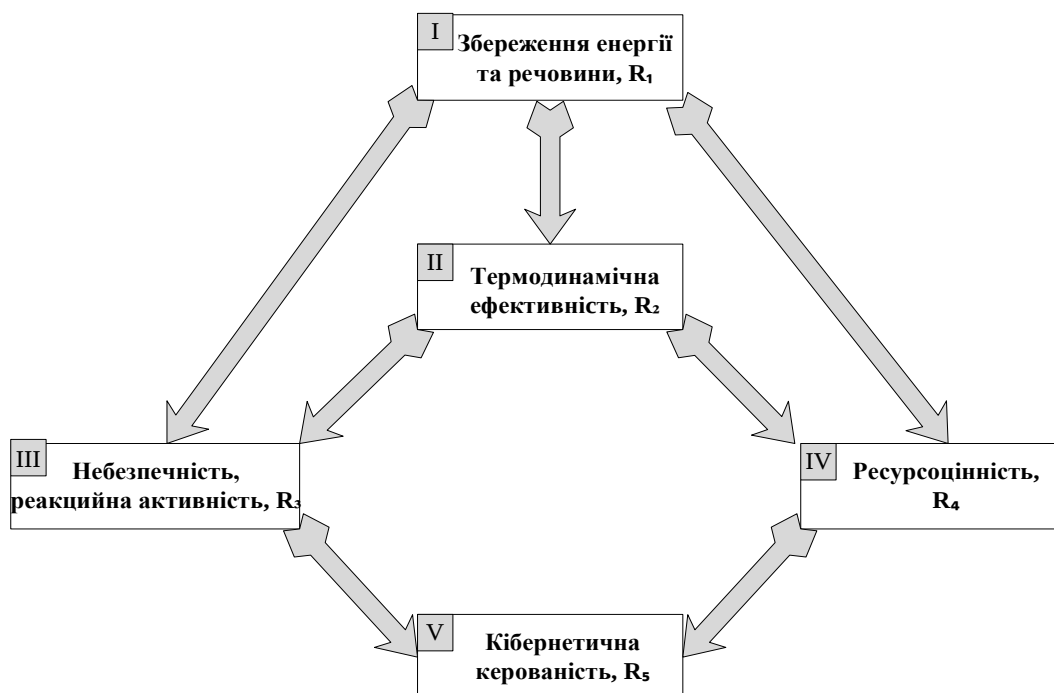


Рисунок 1 – Функціональна схема управління промисловими відходами. Тут: R_1 – фундамент, джерело всіх залежностей; R_2 – фільтруючий рівень, що з'єднує природні закони, фізику, хімію та ін.; R_3 і R_4 – відображає критерії щодо небезпечності/цінності, це змістовні блоки, що визначають техніко-економічні пріоритети; R_5 – відображає рівень інтеграції, що забезпечує стійкість та оптимізацію в управлінні відходами.

У роботі розглянуто п'ять, на наш погляд, основоположних та ієрархічно пов'язаних принципів, які можуть бути основою сучасної систематизації та класифікації підходів до управління відходами залежно від їх властивостей та якостей, у відповідності до ст. 4,а WFD ES.

Принцип R_1 . Принцип збереження та перерозподілу енергії та речовини (базовий, фізико-хімічний рівень) при управлінні відходами.

На базовому рівні систематизація починається із закону збереження енергії та речовини. Будь-які методи переробки відходів передбачають трансформацію їх складу чи форми. Залежно від агрегатного стану (тверді, рідкі, газоподібні), щільності, ентальпії та інших характеристик вибираються термічні, фізико-хімічні або механічні методи впливу на конкретні види відходів.

Принцип R_2 . Принцип термодинамічної ефективності та незворотності (ентропійний аналіз) у процесах переробки відходів. Цей принцип дозволяє виділяти процеси з високим ступенем втрат (низький ексергетичний ККД) і визначати умови, за яких переробка відходів призводить до найбільшої потенційної користі. Це особливо важливо при переробці високоентропійних сумішей, наприклад флотошламів або багатокomпонентних органічних розчинників.

Принцип R_3 . Принцип безпеки та реакційної активності речовин (еколого-хімічний рівень) для відходів різних класів безпеки. Класифікація відходів на основі таких класів безпеки (за GHS, REACH та іншими міжнародними системами) визначає необхідність у специфічних технологіях: нейтралізації, інкапсуляції, стабілізації або спалюванні при високій температурі.

Принцип R_4 . Принцип потенційної ресурсової цінності (ресурсний рівень) відходу. Цей принцип дозволяє виділяти таку якість відходів, як потенційні вторинні ресурси, ще раз підтверджуючи принцип збереження та перерозподілу енергії та речовини. Тут оцінюється зміст цінних компонентів (металів, вуглеців, рідкісноземельних елементів), можливості їх регенерації, повторного використання та включення в цикли виробництва. Відповідно до принципів циклічної економіки та cradle-to-cradle підходу, відходи розглядаються як носії корисної ресурсної функції.

Принцип R_5 . Принцип системної інтеграції та кібернетичної керованості (системний рівень) процесами мінімізації відходоутворення. Найвищим рівнем систематизації в управлінні промисловими відходами є інтеграція методів у рамках кібернетичних та цифрових систем керування відходами. Тут використовуються принципи системного аналізу, еколого-інформаційного моделювання та концепції

«індустріального симбіозу». Сюди ж входять методи та автоматизовані системи прийняття рішень на основі ЛПР, ШІ та технологій моніторингу потоків речовини та енергії в реальному часі. Такий підхід забезпечує динамічну адаптацію відомих методів переробки відходів щодо змін їх складу у існуючих умовах виробництва. Найвищим рівнем систематизації є включення процесів у цифрові та кібернетичні моделі управління, включаючи цифрові двійники, автоматичне управління та зворотний зв'язок за даними моніторингу.

Другим напрямом реалізації анонсованого принципу R_5 є методологія мінімізації промислових відходів у джерелі їх походження – технологічному процесі [1]. Розглянемо його докладніше, оскільки він належить до предметів наших досліджень.

Функціональні та ієрархічні структурні взаємозв'язки між аналізованими принципами управління промисловими відходами (див. рис. 1) відображають послідовність від принципу R_1 , вихідного для всіх зв'язків, до принципу R_5 , як мінімум, точки збору всієї керуючої інформації і, як максимум, автоматизованого управління всією системою поводження з промисловими відходами. Послідовність і наступність кожного з аналізованих принципів відображено в змінах ентропії для системи перетворення відходів. Графік зростання ентропії за рівнями принципів (рис. 2) підкреслює перехід від низькоентропійних фізичних закономірностей (R_1) до високоентропійних складних систем (R_5), що містять переважну інформаційну ентропійну складову як домінуючий керуючий вплив на всю систему.

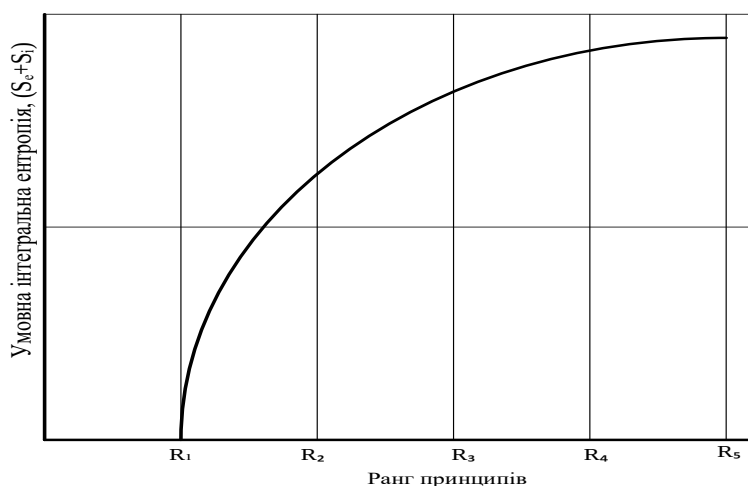


Рисунок 2 – Оцінковий графік інтегральної ентропійної прогресії з інформаційною складовою за функціональними рівнями.

Певну інформацію про ефективність аналізованої системи цінностей при управлінні відходами дає матрицю суміжності для логічних залежностей між

принципами систематизації в управлінні відходами (рис. 3). Матриця дозволяє дати оцінку того, як кожен принцип (рядок) впливає на інші принципи (стовпці). Вплив у матриці виражається логічними значеннями: сірий колір відповідає суттєвій залежності між елементом рядка та елементом стовпця. Білим кольором позначені суміжності з відсутністю такої залежності. Така матриця може лежати в основі формалізації впливу одного принципу на інший і, таким чином, допомагає будувати автоматизовані логічні рішення в галузі управління відходами.

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
R ₁					
R ₂					
R ₃					
R ₄					
R ₅					

Рисунок 3 – Матриця суміжності логічних залежностей між функціональними рівнями у послідовності «принципів R_i ».

Ієрархічна (див. рис. 1) та матрична (див. рис. 3) інтерпретації дозволяють отримати такі характеристики аналізованих принципів, що відображають їх як суміжність і інцидентність властивостей при взаємодії. Розглянемо їх із позицій узгодженості.

1. Принцип збереження енергії та речовини (R_1), це базовий рівень ієрархії. Його роль є фундаментальною (генератор зв'язків). Індекс вихідної пов'язаності – 3 (див. рис. 3). Індекс вхідної пов'язаності – 0. Функція принципу полягає в завданні основи всієї наступної систематизації. Він визначає допустимі види перетворень, втрат та реакцій.

Принцип R_1 впливає на R_2 , задає фізичні обмеження для керованого відходу збереження енергії та маси відходів, важливі для оцінки їх термодинамічної ефективності. Вплив R_3 визначає форму і фазу небезпечних сполук, впливає на вибір нейтралізуючих технологій переробки відходів. Вплив на R_4 визначає енергетичну та матеріальну цінність відходів. Принцип R_1 не надає прямого впливу на R_5 , але опосередковано впливає через R_2 та R_4 .

2. Принцип термодинамічної ефективності (R_2) виконує в системі роль енергетичного фільтра/регулятора. Індекс вихідної пов'язаності для нього – 2, індекс вхідної пов'язаності – 1. Принцип R_2 ґрунтується на принципі R_1 , але впливає на R_3 , визначає можливість безпечної нейтралізації керованого відходу з мінімальними енергетичними втратами. Його функція полягає в оцінюванні втрат, ексергетичної ефективності та цінності вторинних ресурсів (вплив на R_4), реалістичності процесів. Визначальним для нього є показник зростання інтегральної ентропії (насамперед інформаційної S_i) у міру просування рівнями (див. рис. 2).

3. Принцип безпеки та реакційної активності (R_3) виступає як «фільтр» безпеки та екологічної прийнятності для керованого промислового відходу. Основна його функція - вплив на вибір методів нейтралізації промислового відходу та вимоги до моніторингу. Індекс вихідної зв'язаності - 1, індекс вхідної зв'язаності - 2. Він впливає на R_5 – чим вище безпека та реакційна активність, тим вище вимоги до автоматизації та кібернетики. Цей принцип ґрунтується на R_1 і R_2 (умови зберігання, переробки, екзотермічні реакції тощо).

4. Принцип ресурсної цінності (R_4) є основним для реалізації найсучаснішого принципу R_5 : цінні компоненти відходів вимагають точного моніторингу та автоматизованого вилучення. Його роль полягає у ретрансляції ресурсних пріоритетів під час виборів методу управління промисловим відходом. Його функція полягає в участі в прийнятті рішень про вилучення корисних компонентів з промислового відходу. Індекс вихідної зв'язаності – 1, і індекс вхідної зв'язаності – 2. Він може залежати як від R_1 , так і від R_2 (через фазовий склад, концентрації, розподіл за енергіями та ентропією).

5. Принцип кібернетичної керованості (R_5), це найвищий рівень, що дозволяє отримувати дані від усіх нижченаведених принципів. Його роль вкрай важлива, як системного інтегратора у фінальній точці поводження з відходом. Головна його функція визначена як інтеграція всієї інформації до автоматизованих систем, цифрових двійників, моніторингу. Цей принцип не впливає на інші принципи безпосередньо, але модифікує реалізацію всіх процесів через управління, зворотний зв'язок, оптимізацію. Індекс вихідної зв'язаності - 0, і індекс вхідної зв'язаності – 2 показує на вибірковість цього принципу.

Така класифікація основних принципів може бути готовим інструментом для управління промисловими відходами, наприклад, у вигляді алгоритму послідовності функцій та керуючих процесів.

Як приклад управління *вже створеними промисловими відходами*, на підставі запропонованої моделі «принципів», розглянемо процедури мінімізації відходів, що відбуваються у вигляді відпрацьованих акумуляторних (літій-іонних) батарей. З метою визначення оптимального способу переробки/утилізації цих відходів на основі властивостей за п'ятьма розглянутими принципами, складемо автоматизовану логічну модель (у вигляді квазіалгоритму класифікації відходів). Оцінка цього типу відходів за всіма п'ятьма ієрархічними принципами з обґрунтуваннями, наведена нижче (табл. 1).

Таблиця 1 – Квазіалгоритм (на основі логіки п'яти принципів) та порядок керуючих дій з переробки відходів акумуляторних батарей

Алгоритм розрахунку	Порядок аналізу
markdown Копіювати Редагувати Вхід: Інформація про відхід → { Хімісклад, агрегатний стан, теплота , токсичність , економічна цінність , керованість } 1. Оцінка за принципом R_1(фізико-хімічні властивості): - Якщо агрегатний стан → тверде і щільність енергії > поріг : → застосувати метод «механічний поділ» або «піроліз» - Якщо рідке/газоподібне : → перейти до оцінки розчинності і летючості 2. Оцінка за Принципом R_2(ентропія та ефективність): - розрахувати ΔS(ентропійний приріст) та ΔE_x(ексергетичний вихід) - Якщо ефективність переробки > 40%, відзначити як "високоефективний процес" - Інакше → шукаєм рекуперативні або замкнуті схеми 3. Оцінка за принципом R_3(небезпека): - Якщо токсичність/вибухонебезпечність > критичної норми: → Методи дезактивації + пасивація - Інакше → допускається стандартна переробка 4. Оцінка за принципом R_4(ресурсоцінність): - Якщо зміст цінних елементів > x%:	Етап 1: Збір вихідної інформації Тип відходу: акумуляторні батареї (літій-іонні, свинцево-кислотні та ін.) Стан: комплексний (твердий, рідкий - електроліт) Потенційна ресурсоцінність: висока (метали: Li, Co, Pb, Ni) Токсичність: висока Етап 2: Логічна послідовність застосування п'яти принципів Принцип 1 — Закон збереження речовини та енергії → Складна конструкція, різні фази → Потрібне попереднє сортування та демонтаж перед переробкою. Принцип 2 - Термодинамічна ефективність → Елементи (особливо літєві) мають високу ексергетичну цінність → Ефективні пірометалургійні (відновлення) і гідрометалургійні (вилуговування) методи. Принцип 3 - Небезпека речовини → Висока токсичність, ризик самозаймання → Потрібні: охолодження, хімічна нейтралізація електролітів, пожежозахист на складі. Принцип 4 — Ресурсоцінність → Виймаються: літій, кобальт, нікель, графіт, свинець → Можуть використовуватися повторно у виробництві батарей, сплавів та ін. Принцип 5 — Системна інтеграція → Роботизовані лінії розбирання → II для сортування за хімічним складом →

→ рекомендується вилучення (гідрометалургія і ін.) - Інакше → допускається пряма утилізація 5. Оцінка за Принципом R_5 (керованість та інтеграція): - Якщо об'єкт входить до автоматизованого ланцюга або може бути відстежений: → інтеграція в цифрову модель - Інакше → необхідно ручне управління і дооцінка Кінець	Підтримка циклів "cradle-to-cradle" (від батареї до батареї).
--	--

Слід розуміти, що у фізично обґрунтованих «принципах» за основу приймається послідовно склад відходу, ставлення до енергії, що сприймається, безпека для біологічних систем, раціональність і, нарешті, керованість. У такій же послідовності розташовуються методи переробки літій-іонних батарей – від механічного низькотемпературного поділу до високотемпературних та хімічних впливів та двійникових ефектів, залежно від стану та готовності сировини, що переробляється (таблиця 2).

Таблиця 2 – Оцінка результатів послідовного керування відходами акумуляторних (літій-іонних) батарей відповідно до запропонованої систематизації.

Принцип	Критерій оцінки	Характеристика Li -іонних АКБ	Послідовність прикладів технологій
R_1	Хімічний склад, агрегатний стан, щільність енергії	Висока щільність енергії ; містить літій, кобальт, графіт, органічні електроліти;	Механічний поділ, термоліз, пірометалургія
R_2	Енергоємність процесів, ексергетичний вихід	Термічне відновлення вимагає високої енергії; оптимізується за рахунок рекуперації;	Високотемпературна переробка в печах, рекуперація тепла
R_3	Токсичність, горючість, реактивність компонентів	Летючі електроліти, вибухонебезпечні у зруйнованому вигляді; можливий термічний розгін	Деактивація з попереднім розрядом, пасивація електроліту
R_4	Можливість вторинного вилучення елементів	Висока цінність літію, кобальту, нікелю; вилучення з високим економічним ефектом	Гідрометалургія, селективне осадження, іонообмін
R_5	Можливість цифрового керування та моніторингу	Весь цикл може бути включений в автоматизованої сортувальні лінії.	SCADA-системи на лініях збору АКБ, цифрові двійники переробних заводів

Як випливає з таблиці 2, в технологіях переробки літій-іонних батарей енергоефективність може досягатися за рахунок реакцій нейтралізації з мінімальними витратами. Хімічна реактивність визначає вибір реагентів. Екологічна безпека виключає скидання продуктів у довкілля. Економічна доцільність залежить від вартості реагентів та обладнання. Послідовний аналіз можливостей кожного з аналізованих принципів дозволяє формувати ті чи інші ефективніші та раціональніші схеми переробки даного відходів, залежно від глибини цього аналізу та існуючих технічних можливостей. Можливості такої системи управління не обмежуються отриманими результатами і можуть бути глибшими, залежно від граничних умов реалізації.

Висновок

Запропонована ієрархія з п'яти принципів – від фізичних законів до цифрового управління – забезпечує основу науково обґрунтованої систематизації методів управління відходами. В їх основі – системний підхід до класифікації методів поводження з промисловими відходами. Така ієрархічна побудова дозволяє враховувати як фундаментальні закони природознавства та фундаментальні властивості речовин, так і можливості сучасної техносфери, інтегрованої з кібернетичними системами управління.

Література

1. Волошин В. С. Відходи та їх природа. СПД Самченко, Київ-Маріуполь, 2024. 630 с.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ ДОДАТКОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМАМИ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Відомо, що теплова енергія є кінцевим енергетичним відходом для будь-якого технологічного процесу. Це відхід, кількість якого майже необмежена в масштабах економік світу, а здатність її утилізувати невеличка. Одним з можливих способів мінімізації цього специфічного відходу є використання якісної первинної енергії в технологічному процесі.

Якість енергії визначається її здатністю виконувати корисну роботу з мінімальними втратами, що пов'язано з термодинамічними характеристиками, такі як ексергія (доступна робота) та ентропія (міра розсіювання). Методи оцінки якості енергії, її здатності до перетворення в інші види стає подалі все актуальною проблемою, якщо враховувати всі теплові відходи, що супроводжують велику кількість існуючих технологічних процесів. Адже, на кожну одну кВт·год використаної енергії людина залишає Природі не менш $0,45 \div 0,5$ кВт·год найменш якісної теплової енергії. Для світової економіки це втрати, що вимірюються тисячами гігаджоулей створеної колись енергії – електричної, механічної, ядерної, хімічної.

Загалом для оцінки якості енергії, яка використовується в технологічних процесах, можна спиратися на коефіцієнт якості (μ) — це відношення ексергії до повної енергії (A_x/E_w) виражене у частках ($0 \div 1$). Чим вище μ , тим якісніша енергія. Очевидним показником якості є й сама ексергія системи (A_x), яка виражає максимальну корисну роботу, що видобувається з енергії відносно температури навколишнього середовища $A_x = H - T_0 \Delta S$ де: H — ентальпія (тут повна енергія), T_0 - температура навколишнього середовища (зазвичай 298 K), ΔS - зміна ентропії.

При відносно величезній кількості технологічних процесів, вигаданих людиною, у них використовується обмежена кількість видів енергії. Зведені дані про типові види енергії, які найчастіше використовуються в технологічних процесах, а також деякі їх термодинамічні характеристики наведені в таблиці 1. Види енергії представлені в

порядку зменшення їхньої якості. Найбільш якісною енергією, яка часто використовується в технологічних процесах, є електрична ($\mu \approx 1$), тому що вона майже без теплових втрат перетворюється на ексергію. Найменш якісною вважається низькотемпературне тепло $\mu \approx 0,05 \div 0,1$ через високу ентропію та низьку здатність до виконання роботи. Наприклад, для механічної енергії втрати незначні і пов'язані тільки з тертям в системі, а для хімічної енергії з високою ексергією, частина енергії втрачається з теплом, що виділяється при реакціях

Таблиця 1 – Деякі характеристики видів та джерел енергії, що застосовуються в технологічних процесах у міру зменшення їх енергетичної ефективності (за даними робіт [1, 2, 3, 4, 5]).

Вид енергії	Коефіцієнт якості (μ)	ΔS , Дж/К (діапазон)	A_x , кДж/кг	Термодинамічні показники
Електрична	1.0	0÷10	3600	$H = 3600$
Механічна	0.95	20÷100	950	$H = 1000$
Пружина я	0,92	50÷150	920	
Хімічна	0.85	4000÷6000	34000	$H = 40000$
Електромагнітна	0,92	250÷550	2952	
Ядерна	0.80	5000÷8000	$8 \cdot 10^7$	$H = 10^8$
Високотемпературне тепло	0.60	1500÷2500	1800	$H = 3000, T = 1200K$
Середньотемпературне тепло	0.30	3500÷4500	600	$H = 2000, T = 500K$
Електростатична	0,25	1000÷2000	250	
Магнітостатична	0,20	1500÷2500	200	
Низькотемпературне тепло	0.10	5500÷7000	100	$H = 1000 T = 310K$

Розрахунки термодинамічних показників дуже прості, але дають повне уявлення про властивості енергії, які потрібні при оцінці її якості за критерієм «корисна робота». Зокрема:

-для електричної енергії (прийемо за константу $H = 3600$ кДж/кг - еквівалент 1 кВт·год на 1 кг умовної маси. Тоді $\Delta S = 0$ (умовно не має теплових втрат), а $A_x = 3600 - 298 \cdot 0 = 3600$ кДж/кг;

-для механічної енергії та $H = 1000$ кДж/кг (наприклад, кінетична енергія), запишемо $\Delta S = 0,05$ кДж/(кг · К) (тертя), а $A_x = 1000 - 298 \cdot 0,05 = 985$ кДж/кг;

-для хімічної енергії, наприклад, $H = 40000$ кДж/кг (теплота згоряння бензину), $\Delta S = 5,0$ кДж/(кг · К) і $A_x = 40.000 - 298 \cdot 5,0 = 38510$ кДж/кг;

-для електромагнітної енергії також приймаємо $H = 3600$ Дж/кг і $\Delta S = 0,4$ кДж/(кг·К), тоді $A_x = 3600 - 298 \cdot 0,4 = 3480$ кДж/кг, тощо.

Для оцінки якості енергії можна використовувати і кілька інші критерії і залежно від особливостей технологічного процесу, наприклад:

- доступність - ступінь легкості отримання та використання енергії;
- екологічна чистота - рівень впливу на навколишню середу;
- стабільність та надійність поставки - можливість постійного та безперервного забезпечення енергією;
- вартість - витрати на виробництво і доставку енергії.

Подача якісної енергії в певній її кількості є невід'ємною частиною механізмів подолання принципу термодинамічної двоєдності, як причини створення будь-якого виду промислових відходів [1, 2]. Роль і значення якості такої енергії, через ексергетичні механізми впливу на сировину, у будь-якому технологічному процесі неймовірно висока, а її забезпечення є найбільш впливовим аргументом для процесів мінімізації відходів в джерелі їх виникнення – технологічному процесі.

Ми звернемо увагу на такі модифікації існуючих видів енергії, які можуть застосовуватися в технологічних процесах, залежно від їх особливостей, наприклад, енергія постійного знаку, що подається, енергія зворотного знаку, знакозмінна (включаючи синусоїдальну залежність), високочастотна, імпульсна енергія та енергія резонансних частот.

Для оцінки якості таких видів енергії, можна використовувати той же підхід, що і раніше (таблиця 2). Якість визначається через коефіцієнт μ як відношення ексергії (E_x) до повної енергії (E_w), з урахуванням термодинамічних показників (ентропії та негентропії) або ставленням корисної роботи в системі). Види енергії є формами передачі або перетворення, а не самостійними джерелами, тому їх вплив на якість раніше розглянутих видів енергії (наприклад, електричної, механічної) залежить від ефективності перетворення та втрат.

Таблиця 2. – Деякі модифікації енергії, здатні змінити її якість та термодинамічні характеристики (за даними робіт [3, 4, 5, 6])

Вид енергії	Коефіцієнт якості (μ)	ΔS , Дж/К (діапазон)	A_x , кДж/кг	Термодинамічні показники
Постійного знаку	0.98	10÷50	3528	(ΔS мінімальна), H = 3600
Зворотного знаку	0.90	100÷300	3240	(ΔS від перемикачів), H = 3600
Знакозмінна (синусоїдальна)	0.85	200÷500	3060	(ΔS від нагріву), H = 3600
Високочастотна	0.80	300÷600	2880	(ΔS від розсіювання), H = 3600

Імпульсна	0.75	400÷800	2700	(ΔS від переходів), H = 3600
Резонансних частот	0.9 8	20÷100	3420	(ΔS вкрай невелика), H = 3600

Розглянемо деякі результати оцінки якості запропонованих модифікацій енергії.

1. *Енергія постійного знаку.* Постійний струм або механічне рух в одному напрямі - це мінімальні втрати на коливання.

2. *Подається енергія зворотного знаку.* Енергія зі зміною напрямків (наприклад, зворотний струм), це додаткові втрати пов'язані тільки з перемиканням.

3. *Знакозмінна енергія* (синусоїдальна). Змінний струм або коливання пов'язані з появою втрат на нагрівання та індукцію, але при цьому зменшуються втрати у генерації.

4. *Високочастотна енергія.* Електромагнітні хвилі високою частоти дають високу ефективність при точечному застосуванні, але з'являються втрати на розсіювання.

5. *Імпульсна енергія.* Короткі імпульси енергії, це, перш за все, висока ексергія, але можливі втрати пов'язані з перехідними процесами.

6. *Енергія резонансних коливань.* Енергія, синхронізована з резонансними частотами в самої системі, це, як правило, максимальна ефективність при мінімальних втратах.

Розглянемо вплив якості типових видів енергії в технологічному процесі на ефективність виконання необхідних дій, пов'язаних, наприклад, з виникненням термодинамічних сил, здатних цілеспрямовано змінити стан матеріальних потоків, які раніше в технологічних процесах прямували у відходи. Критерії якості: A_x - ексергія системи, μ - коефіцієнт якості енергії.

Припустимо, для базової електричної енергії H = 3600 кДж/кг (еквівалент електричної енергії, зазначений вище). Тоді

Модифікація енергією постійного знаку: $\Delta S = 0,03 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. $\Delta S_{\text{cp}} = 30 \text{ Дж}/\text{К}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,03 = 3591 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,96.$$

Модифікація енергією зворотнього знаку. $\Delta S = 0,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ $\Delta S_{\text{cp}} =$

200 Дж/К

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,2 = 3540 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,90.$$

Модифікація з змінною енергією. $\Delta S = 0,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. $\Delta S_{\text{cp}} = 350 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,35 = 3495 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,85.$$

Високочастотна енергія. $\Delta S = 0,45 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \Delta S_{\text{ср}} = 450 \text{ Дж}/\text{К}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,45 = 3465 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,80.$$

Імпульсна енергія. $\Delta S = 0,60 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \Delta S_{\text{ср}} = 600 \text{ Дж}/\text{К}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,60 = 3421 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,75.$$

Енергія резонансних коливань. $\Delta S = 0,06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \Delta S_{\text{ср}} = 60 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,06 = 3582 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,98.$$

Для інших видів енергії така лінійка результатів буде іншою.

Вплив на якість деяких із раніше розглянутих видів енергії

Електрична енергія. Постійний знак ($\mu \rightarrow 0,96$), резонанс ($\mu \rightarrow 0,98$) покращують якість електричної енергії, високочастотна складова ($\mu \rightarrow 0,80$), а також імпульсна ($\mu \rightarrow 0,75$) знижують її якість.

Хімічна енергія. Високочастотна енергія та енергія резонансного впливу можуть оптимізувати згоряння або нагрівання, піднімаючи μ на 5-10%.

Теплова енергія. Резонансний вплив на основне джерело енергії в системі сприяє зниженню ΔS , покращує μ на 10 -1 5 %.

Тепер відзначимо наступну важливу особливість, що відноситься до якості енергетики відходоутворення. Незважаючи на те, що в цілому підвищена складність технологій вимагає більшої якості енергії та більшої кількості її видів, майже 85 % поширених технологічних процесів, внаслідок яких отримують 80 % світовий валовий продукції, засновані на механічному та тепловому впливах на сировинні матеріали або це їхні комбінації. Ще частина технологій включає виробництва, в яких використовується хімічна енергія перетворень. При цьому як підведеною енергією використовується, головним чином, електрична енергія та енергія згоряння органічного палива, причому для отримання першою також витрачається енергія горіння органічних речовин. Тому з всіх можливих перетворень енергії у виробничих системах нас може цікавити тільки невелика їх частина, а саме, перетворення

- електричної енергії в механічну та теплову;
- теплову енергію в механічну;
- механічної в теплову.

У певній мірі це відноситься і до електрохімічних, магнітоелектричних перетворень, які мають місце, але в значно менших масштабах, характерних для енерговиробничих та спеціальних енергоперетворювальних систем.

Істотним фактором, що визначає процеси відходоутворення, є способи перетворення та використання енергії в технічній системі. Іншими словами, мова тут може йти про рівень розвитку технічної системи - показник, який хоч і не є визначальним для якості використовуваної енергії, але надає суттєве вплив на процеси відходоутворення. Найпростішим прикладом, що доводить це, є динаміка розвитку теплових машин – парових, поршневих, турбінних, реактивних, інерційних, а також відповідні умови перетворення енергії, що сприяють зниження ентропії у цих системах.

Продовжуючи наші міркування, звернемося до схеми взаємних часткових перетворень різних видів найчастіше зустрічаються видів енергії, поданої на роботах Г.А. Алексєєва (табл. 3).

Таблиця 3 – Особливості взаємних перетворень різних видів енергії

№	Вид енергії	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Механічна		+	⊕	+	+	⊕	+	+
2.	Пружна	⊕		⊕	-	-	+	-	-
3.	Теплова	⊕	+		+	+	⊕	+	+
4.	Хімічна	+	-	⊕		-	+	-	+
5.	Електростати – чеська	+	-	-	-		+	-	+
6.	Електродинами – чеська	⊕	-	⊕	+	+		+	⊕
7.	Магнітостати – чеська	+	-	-	-	-	-		+
8.	Електромагнітна	+	-	+	-	-	⊕	-	

*) ⊕- Перетворення енергії, що мають практичне застосування;

+ – можливе безпосереднє перетворення;

- – відсутність перетворення.

Звернемо увагу на те, що у перетвореннях енергії, спрямованих на збільшення її якості, потенційно може брати участь 75% всіх способів перетворення, в той час як із пониженням якості енергії працює лише 25% перетворювачів. Кожен другий вид перетворення є двостороннім та взаємоподібним. Однак на практиці для

взаємоперетворень використовується тільки кожен п'ятий спосіб перетворення енергії. І далеко не завжди вони спрямовані на використання якісної енергії.

Загальний алгоритм аналізу якості енергії, яка потрібна на управління процесами мінімізації відходів у межах технологічного процесу надано на рис. 1.

Пошук необхідного додаткового джерела енергії починається з визначення базового типу енергії, згідно з алгоритмом, та аналізу можливих її модифікацій (I -й крок алгоритму). У розпорядженні знаходиться 11 найчастіше застосовуваних видів енергії та шість розглянутих вище найбільш типових модифікацій, всього теоретично можливих 66 варіантів для використання додаткової енергії, за якістю відповідних головною умовою – зміні стану термодинамічної рівноваги для тієї частини сировини, яка у звичайних умовах перетворюється на відхід.

Відношенням, узгодженим за якістю з існуючим у технологічному процесі джерелом енергії приймемо умову, однакову для всіх видів енергії та їх модифікацій, а саме, $\Delta S_i < \Delta S_{min}$ і $\mu_i \rightarrow \mu_{max}$, маючи на увазі під значенням ΔS_{min} мінімально можливу розрахункову зміну ентропії в технологічному процесі, а під μ_{max} - максимально можливу термодинамічну ефективність, орієнтовану на найбільш якісну енергію.

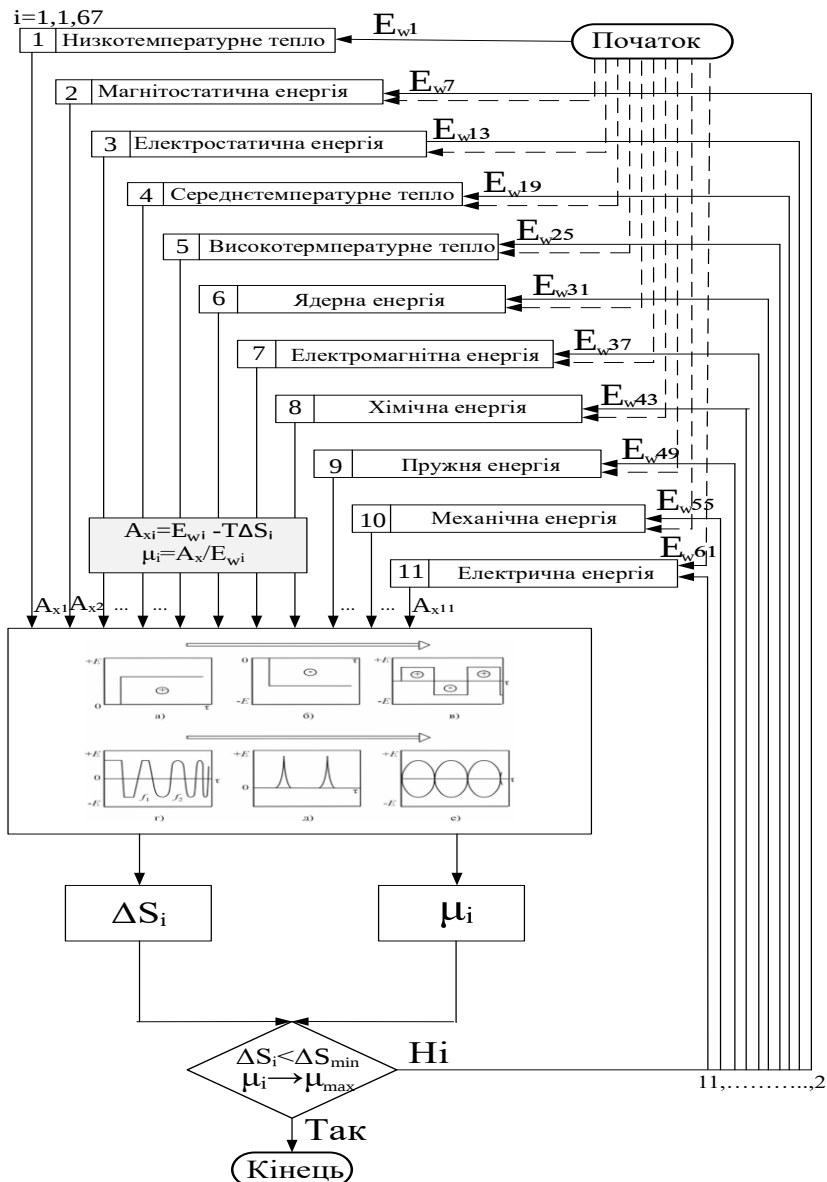


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму пошуку якісної енергії, здатної до цільового управління матеріальними потоками відходоутворення у технологічному процесі.

Безумовно, далеко не всяка енергія за своєю якістю здатна до виконання такої задачі. І докладний перебір варіантів, згідно з алгоритмом, це тільки перша частина такого аналізу. за умовами конкретного технологічного процесу. За властивостями сировини, термодинамічних параметрів, тривалості процесу можна підібрати необхідне джерело енергії.

Висновок

Якість енергії, що використовується в будь-якому технологічному процесі є суттєвим фактором, що впливає на процеси відходоутворення не тільки матеріальної його частини, але і з енергетичної. Вимоги до якості додаткової енергії, що вводиться в технологічний процес, це друга умова, необхідна подолання принципу термодинамічного двоєдності з метою мінімізації відходів в межах самого технологічного процесу, забезпечуючи умови національного законодавства про поводження з відходами.

Література

1. Волошин В. С. Відходи та їх природа. СПД Самченко, Київ-Маріуполь, 2024. 630 с
2. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. СПД Самченко, Київ-Маріуполь, 2024. 80 с.
3. Moran M.J., Shapiro H.N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. 1040 p.
4. Cengel Y.A., Boles M.A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 1008 p.
5. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016. 792 p.
6. Dincer I., Rosen M.A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 576 p.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ЩОДО ЕНЕРГЕТИЧНИХ УМОВ ДЛЯ ПОДОЛАННЯ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДНОСТІ, ЯК МЕХАНІЗМУ СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ

У дослідженнях накопичено достатній досвід, що ілюструє принцип термодинамічної двоєдності як основи механізмів утворення відходів у технологічних процесах [1, 2]. Показано, що мінімізація відходів у самому джерелі їх виникнення – технологічному процесі залежить, перш за все, від стану термодинамічної нерівноважності компонентів сировини по відношенню до джерела енергії, що використовується в технологічному процесі. При певних умовах, щодо використання зовнішньої енергії, виробнича система здатна переходити не тільки з рівноважного стану в нерівноважний, але і випробує стан невизначеності і навіть хаосу щодо мінливих енергетичних умов технологічного процесу [3]. Механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії, спрямованими на мінімізацію відходів всередині самої системи, зі стану парної біфуркації і відповідного їй стану термодинамічної нерівноважності в стан біфуркаційної парної множинності і далі до хаосу, стає тим самим теоретичним обмеженням технологічного процесу, що перешкоджає подоланню принципу термодинамічної подвійності.

Для обґрунтування таких висновків у статті наведено результати розрахунково-експериментальних даних, отриманих під час вивчення репрезентативної вибірки існуючих технологічних процесів.

Підсумки дослідження залежності типу $\frac{\Delta S}{E_0} = f(r)$ для різних технологій представлені на рис. 1 у вигляді окремих точок початкових значень зміни ентропії (у вигляді відповідних *U-критерію Манна-Уїтні* і середньоквадратичної похибки $\pm\sigma_{\Delta S}$ її математичного очікування $M_{\Delta S}$). З урахуванням похибок, отриманих при обробці експериментальних даних (в залежності від потужності, типу технічної системи, її продуктивності, якості сировини і кількості кінцевих відходів виробництва), цифри на

графіку в області подвоєння результатів можуть бути приблизно порівнянні з закономірностями, викладеними в роботі [4].

Значення показника r у послідовності технологій опосередковано визначаються розміром ΔS_{max} при $\lambda \approx 0,5$ на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки відзначені в координатах «зміна ентропії – ваговий коефіцієнт λ » для досліджуваних технологічних процесів та їх модифікацій, наприклад, як показано в [2]. У переважній більшості технологій присутня базова або модифікована *теплова* енергія (69%), з дуже малою тепловою ефективністю і високою ентропією процесу. У 14% досліджуваних технологічних процесів використовується *електрична* енергія, але тільки 5% з них, це чисто електричні та електролітичні процеси, а решта - їх електротермічні модифікації, ККД яких також вкрай низький при високих значеннях ентропії. Трохи більше 15% від загальної вибірки технологічних процесів пов'язані з використанням інших типових видів енергії (механічної, пневматичної та гідравлічної та ін.).

Для **мети цієї роботи** важливими є інтервали, в яких відображається відношення параметрів системи до стану термодинамічної рівноваги. Вони досить чітко відрізняють чотири акцентні області (див. рис. 1).

1. Умова, коли $0 \leq r < 0,7$, відображає область термодинамічної рівноваги для всієї виробничої системи. Усі траєкторії системи прагнуть нуля. Як правило, тут виконується умова $J_w X_w = 0$ або $A_w = 0$, коли технологічний процес взагалі пов'язаний з цілеспрямованим утворенням потенційних відходів (w). Або коли нерівнозначні термодинамічні сили, що спрямовані на виробництво товарної продукції (p) та відходу (w), розділені і перебувають у стані термодинамічної двоєдності [2].

2. Умова перетину системи з рівноважного стану до стану слабкої термодинамічної нерівноважності відноситься до області з $r \geq 0,7$ (див. рис. 1). У такому стані система прагне фіксованої точки значення ΔS і знаходить здатність до реалізації принципу термодинамічної двоєдності по відношенню до різних частин J_0 і J_w матеріального потоку (сировини). При цьому лише умови $J_0 X_0 \geq 0$ явно замало для цілеспрямованого перетворення другої частини матеріальних потоків J_w , які довільним чином переходять у відходи. Виникає необхідність у деякому $X_w \neq 0$, що, в свою чергу, накладає обмеження на об'єми сумарної зовнішньої енергії.

3. Цікава умова $r \leq 3,5$, при якій розрахункові $J_w X_w \sim 0,62 E_0$. Вона співвідноситься з тією часткою додаткової зовнішньої енергії, якої буде достатньо, щоб термодинамічні сили X_w , що реалізуються в сильно нерівноважній системі, були здатні

до перетворення матеріального потоку J_w у напрямку його суттєво інших якостей наприклад, споживчої цінності. Підкреслимо гіпотетичний характер цієї залежності.

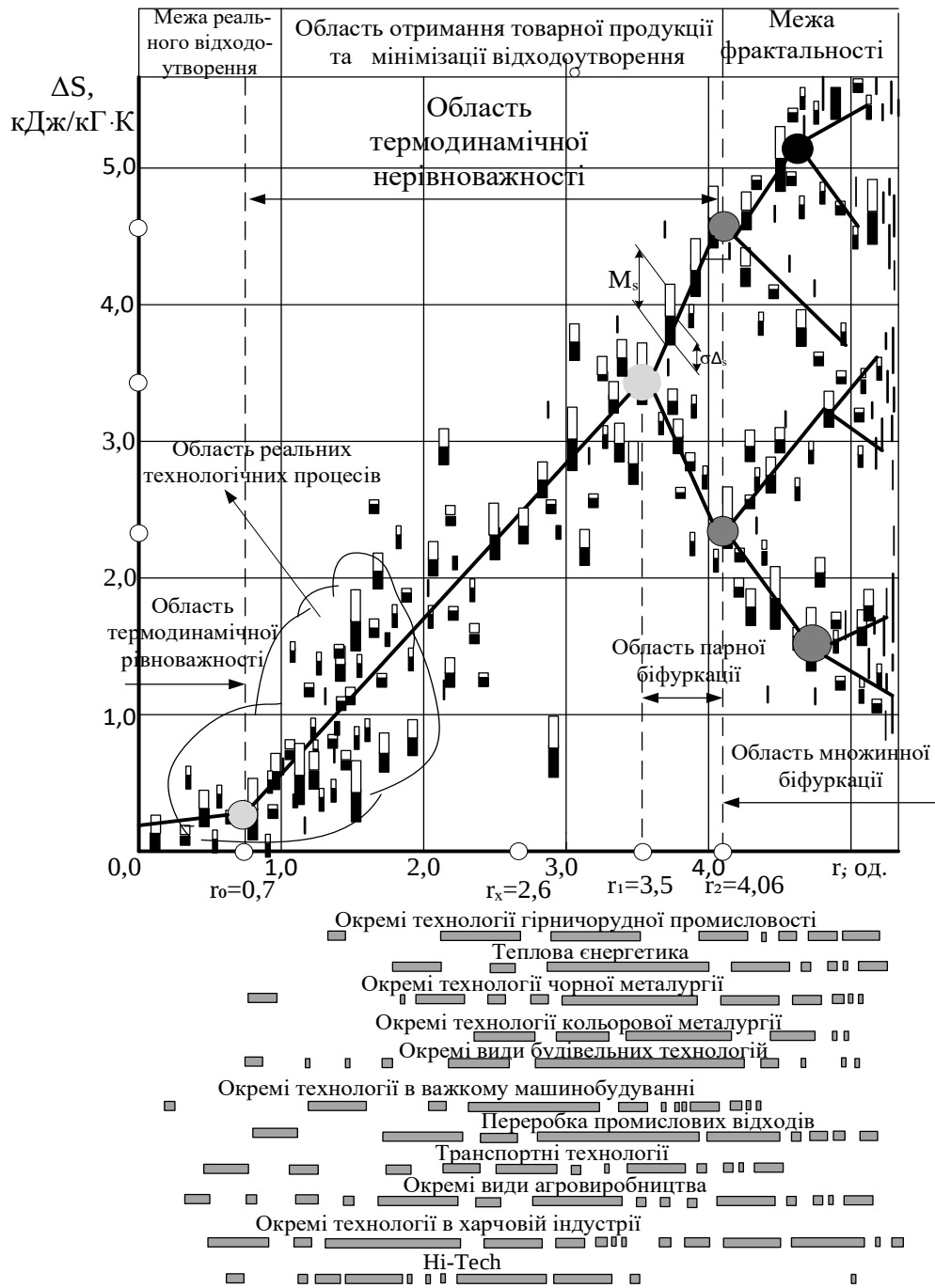


Рисунок 1 – Розрахункові дані для оцінки межі термодинамічної нерівноважності та хаосу для різних технологічних процесів. (Окремо виділена область для реальних технологічних процесів та область гіпотетичних розрахункових даних).

4. В той же час, при первинній недостатності додаткової зовнішньої енергії, за умовою $J_w \cdot X_w < 0,62E_0$ відбувається перехід системи до періодичної поведінки щодо параметра r . Зокрема, при дотриманні умови термодинамічної нерівноважності в

системі, наприклад, при $r > 3,5$ коли існують розрахункові $J_w X_w \leq 0,56 E_o$, вона може стати об'єктом парної біфуркації, тобто невизначеності, а при $r \approx 4,06$ – виявляти ознаки вже множинності парних біфуркацій, тобто сильної невизначеності, яка ставить під сумнів можливість енергетичного впливу на J_w .

5. Далі, за умови розрахункових $r \geq 4,06$ та відповідних вже $J_w X_w \leq 0,39 E_o$, тобто, за подальшої недостатності енергії, що вводиться (оцінково менше 39% від початкової, необхідної для забезпечення основного технологічного процесу), система переходить у стан повного хаосу, з відсутністю чутливості до початкових умов щодо можливостей не тільки для переробки потенційних відходів (w), але і для реалізації основної мети системи – продукції (p). Тут біфуркаційне множення періодів робить виробничу систему з додатковою, але недостатньою, зовнішньою енергією E_w енергетично некерованою в найближчому діапазоні зміни термодинамічного параметра r .

З викладеного слідує висновок у тому, що умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є *достатність* та одночасна *не перебільшеність* додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, для того щоб вивести ту частину сировини, якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

Порівняємо ці дослідження з прикладними результатами для існуючих технологій в області однієї з найбільш забруднюючих галузей - металургії. Всього за всю історію сталеплавильного виробництва було створено кілька десятків технологічних процесів, деякі, що знайшли практичне застосування, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Загальна характеристика основних технологічних процесів отримання сталі та її відходів, зведених до одиниці товарної продукції.

№№ п/п	Найменування технології	Короткий опис технологічного процесу та його відходи	Кількість відходів, т/т
Технології прямого напрямку			
I	Томасівський процес	Він полягає в продуванні розплавленого чавуну повітрям через дно конвертера, який видаляє домішки, такі як фосфор. Метод був економічним і підходив для переробки залізної руди з високим вмістом фосфору. Відходи: шлак, пил, металобрухт	0,3–0,5

II	Бессемерівський процес	Передбачає продування збагаченого повітря через розплавлений чавун в конвертері. Процес дуже швидкий, але чутливий до складу металу, що подається, зокрема вмісту фосфору та сірки. Відходи: шлак, пил	0,15–0,3
III	Мартенівський процес	Заснований на нагріванні рідкого чавуну і металобрухту у великому агрегаті регенеративної мартенівської печі. Перевагами методу є можливість використання різних видів сировини і ретельний контроль хімічного складу сталі. Відходи: шлак, пила, металобрухт, шлам	0,2–0,4
IV	Киснево-конвертерний процес	Заснований на продуванні рідкого заліза чистим киснем, що забезпечує більш швидке і ефективне видалення домішок. Технологія є однією з найпоширеніших у сучасному сталеплавильному виробництві завдяки своїй енергоефективності. Відходи: шлак, пила, окалина	0,1–0,2
V	Технологія прямого відновлення заліза	Відновлення залізної руди до стану залізного напівфабрикату в твердому стані з використанням природного газу або вугілля при температурі 800–1200°C. Залізо може використовуватися в електропечах для виробництва сталі. Відходи: металічна окалина, пил, залишки вуглецевих матеріалів.	0,05–0,15
VI	Електросталеплавильний процес	Використовується електрична енергія для розплаву металічного брухту та залізрудних матеріалів. Метод надає високу якість сталі та широко використовується для спеціальних сталей. Відходи: шлак, пил, відпрацьована цегла, металічний брухт	0,1–0,25

Кожен з цих технологічних процесів пов'язаний з джерелами енергії різної потужності і якості, кожен має свій певний асортимент відходів. І одне з головних завдань, яке в них вирішується, полягає в отриманні максимальної кількості якісної товарної продукції. А ми затребуємо водночас ще й максимально мінімізувати відходи в самому технологічному процесі. Про це вимагає, як мінімум, динаміка втрат від утворення відходів за кожною технологією в міру її енергетичного насичення і коливання специфіки сировини. Причому кількість відходів, що виносяться на одиницю одержуваного товарного продукту, в залежності від кількості і якості базової зовнішньої

енергії E_0 , специфіки самого технологічного процесу (умов фізико-хімічних реакцій) дає умовну лінію зміни наведеної ентропії $\Delta S/E_0$ в залежності від заданих значень термодинамічних коефіцієнтів r і λ і поведінки самої системи (рис. 2).

Два показника, що впливають на мінімізацію відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, це термодинамічна нерівноважність, як залежність від запропонованого термодинамічного показника r , і енергетична насиченість технологічного процесу, що забезпечує переробку не тільки основного потоку сировини J_0 в корисні продукти, але і тієї частини сировини J_w , яка в звичайній системі відправляється у відходи. Для цього на графіках (див. рис. 2) показана крива зміни ентропії, що приведена до базової енергії системи E_0 . Її аналіз дає уявлення про існування (чи ні) суттєвого резерву для мінімізації відходів у таких технологічних процесах, наближаючи їх до теоретично обґрунтованого рівня.

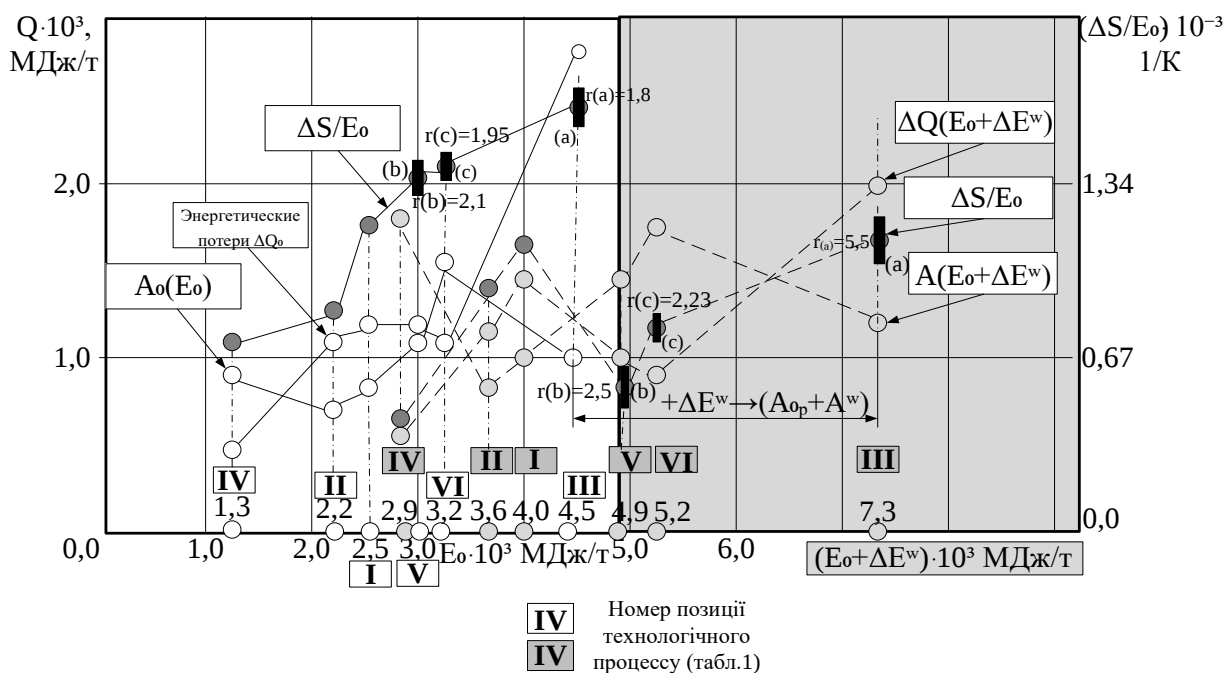


Рисунок 2 – Енергоентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівноважності як показника досяжності теоретичного мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва сталі.

Наприклад, додаткова енергія E_w для високовідходного мартенівського процесу (точка «а») здібна змінювати параметр r_a більш ніж втричі: $r_a = 1,8 \div 5,5$, у порівнянні з класичною технологією, виводячи його умовну сумісну роботу $(J_0 X_0 + J_w X_w)$ за межі спроможності самого технологічного процесу ($E_0 + E_w \gg 1,62$ від базової енергії), чим здатна привести систему в явно не стійкий і, навіть, хаотичний стан, в якому немає

бути специфічної термодинамічної нерівноважності. І, в той же час, технології прямого відновлення заліза і електродугового переплаву (див. точки «b» і «c» відповідно) дають діапазон зміни параметру в декілька процентів: $r_B = 2,1 \div 2,5$ і $r_C = 1,95 \div 2,23$, тобто, показують на досяжність стійкості системи і стану термодинамічної нерівноважності в таких технологіях, коли на них подається додаткова енергія іншої якості з розрахунку $E_0 + E_w \sim 1,62$ від базової енергії. У другому та третьому випадках системи не переходять в стан множинних біфуркації і подальшого хаосу, який перешкоджає якісному впливу на потенційну відходоутворюючу сировину (див. рис. 2).

Такий аналіз може бути виконаний і для інших технологічних процесів шляхом вказівки конкретних енергетичних параметрів з подальшим розрахунком відновленої ентропії і визначенням термодинамічного коефіцієнта. Отримані результати можуть бути використані при прогнозуванні розвитку сучасних технологій, а також в якості подальших досліджень.

Висновки

1. Умовою мінімізації відходів в межах джерела їх виникнення - технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості.

2. Для того щоб вивести частину сировини, з якої зазвичай отримують відходи зі стану термодинамічної рівноважності, і перевести її в стан слабкої нерівноважності, необхідно ввести в систему додаткову енергію в розрахунковому обсязі не менше 62% від енергії, що використовується в технологічному процесі.

3. Вхідження термодинамічної системи в зону парної біфуркації за параметрами феноменологічного рівняння не зменшує можливостей для технологічного процесу щодо досягнення розрахункового теоретичного мінімуму утворення відходів.

4. Механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії зі стану парної біфуркації і відповідного стану термодинамічної нерівноважності в стан парної біфуркаційної множинності, а далі і до хаосу, є тим розрахунковим обмеженням для технологічного процесу, що лімітує досягнення заявленого теоретичного мінімуму утворення відходів.

Література

1. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Маріуполь-Київ. Вид. СПД Самченко. 2024., 630 с.
2. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ. Вид. СПД Самченко. 2024. 80 с.
3. Волошин В. С. Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі в процесах утворення відходів. Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки зб. наук. праць. 2022. Вип. 44. Дніпро: С. 43-53.
4. May, R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, 261(5560), P. 459-467.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Данилова Т. Г., канд. техн. наук, доц.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна

АЛЬТЕРНАТИВНІ МОДЕЛІ ПОДІЄВИХ РИЗИКІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Час, події, ентропія екосистеми, її екологічні ризики, всі ці показники взаємозалежні, і мають свої смислові позиції щодо предмета даної роботи - значення поняття екологічного ризику [1]. У спрощеному варіанті зростання ентропії ΔS системи є кількісною мірою невпорядкованості, яка визначається числом допустимих подій (C), пов'язаних з системою, як $\Delta S \cong k \ln C$. Ентропія системи тим більше, чим більше можливих варіантів її станів, що передбачаються з майбутнього, і пов'язаних з ними подій з числа тих, що визначають ці стани в передньому сьогоднішні. Це означає, що на майбутній час існує ряд невизначених станів подій $C_B \gg 1$, а на даний час існує тільки один, чітко визначений стан певної ризикоутворюючої події $C_H = 1$, що має місце саме в даний момент. Динамічний перехід від ще невизначеного $C_B \gg 1$ до повністю визначеного $C_H = 1$ здійснюється в нескінченно малому часовому інтервалі $\delta\tau \rightarrow 0$, що передує теперішньому і який описаний в роботі [1]. Отже, завжди виконується умова $\Delta S_B \gg \Delta S_H$ (рис. 1).

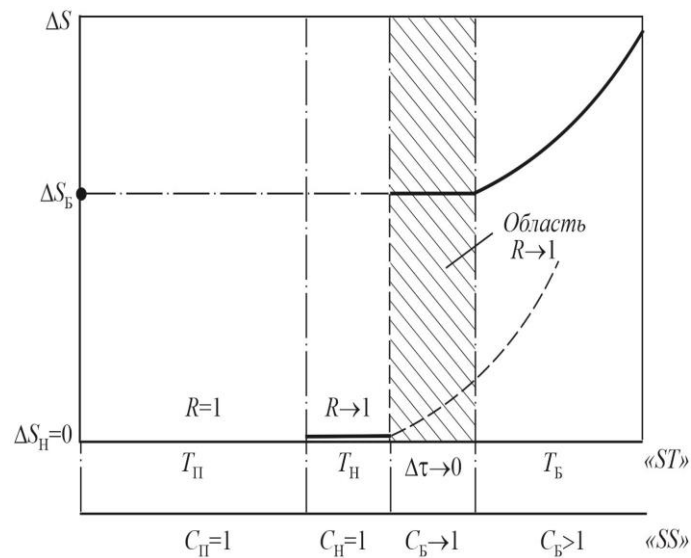


Рисунок 1 – Передбачувана ентропія ризику у співвідношенні часового «ST»

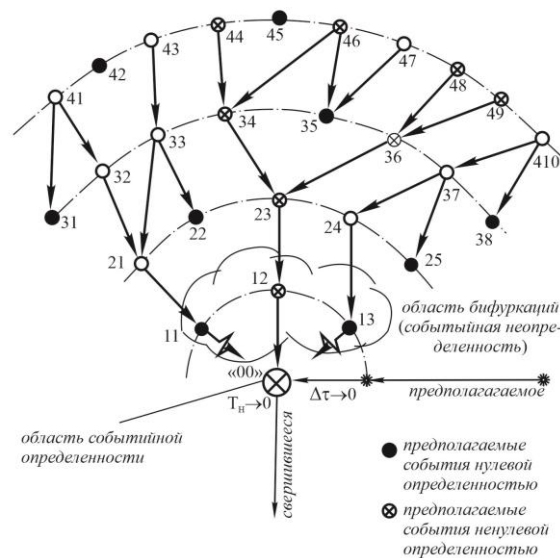


Рисунок 2 – Орієнтований граф відображень передбачуваних подій та їх та подійового «SS» вимірювання. Причинно-наслідкові зв'язки.

А ризик отримання від майбутнього чітко визначеної події при переході від невизначеності ризику до чітко визначеної ризикуутворюючої події сьогодення завжди відповідає запису $R \cong (\Delta S_B - \Delta S_H) / \Delta S_B \rightarrow 1$.

Для певної екосистеми, що знаходиться в стані слабкої нерівноважності в нескінченно малому інтервалі часу $\delta\tau$, термодинамічний потік J_j , що характеризує швидкість тієї чи іншої події j , залежить від термодинамічних сил F_j , які характеризують потенціал цієї події і визначають послідовність і функціонування інших подій або

процесів, що взаємодіють з подією j . Функція дисипації (розсіювання) для такої події пов'язана з цим параметром феноменологічною залежністю Л. Онзагера $\sigma = \sum_{j=1}^n B_j J_j F_j$ для слабо нерівноважних систем [2]. У нашому випадку ця функція виконує, крім усього іншого, роль функції обміну ентропією між взаємопов'язаними і послідовно упорядкованими або неупорядкованими подіями в часі в нескінченно малому інтервалі часу $\delta\tau$ [1].

За Л. Бріллюеном, ступінь упорядкованості Y визначається різницею між максимальним $\Delta_e S_{max}$ і поточним $\Delta_e S$ значеннями зміни ентропії в обміні енергіями між подіями і зовнішнім навколишнім середовищем. Ступінь невпорядкованості системи X , відповідно, визначається як різниця між поточним $\Delta_e S$ і мінімальним $\Delta_e S_{min}$ значеннями зміни ентропії такого обміну, такими, що

$$Y(\tau) = \Delta_e S_{max} - \Delta_e S(\tau); \quad (1)$$

$$X(\tau) = \Delta_e S(\tau) - \Delta_e S_{min} \quad (2)$$

Ступінь упорядкованості і невпорядкованості пов'язана з неоднозначними параметрами вихідної системи і, як правило, не може бути близько порівнянна. У цьому випадку запропоновано переходити до відносних показників для оцінки ступеня впорядкованості екосистеми, наприклад, корелюваних з показниками X і Y в часі, і віднесених до загального масштабу зміни ентропії $\Delta_e S_{max} - \Delta_e S_{min} = \Delta$. При цьому відносне значення для показників упорядкування і невпорядкованості при виконанні очевидної умови $K_Y + K_X = I$ буде таким

$$K_Y = \left(\frac{\Delta_e S_{max}}{\delta\tau} - \frac{\Delta_e S(\tau)}{\delta\tau} \right) / \frac{\Delta}{\delta\tau}. \quad (3)$$

$$K_X = \left(\frac{\Delta_e S(\tau)}{\delta\tau} - \frac{\Delta_e S_{min}}{\delta\tau} \right) / \frac{\Delta}{\delta\tau}. \quad (4)$$

Методика дослідження визначає 10 випадково вибраних, але впорядкованих і взаємопов'язаних подій для моніторингу та прогнозування найбільш ризикоутворюючих з них в абстрактній екосистемі, з періодичністю один раз на 5 днів

протягом 100 днів. Для кожного ланцюга подій обчислюється відносна величина локальної питомої зміни ентропії за заданий проміжок часу, визначається мінімаксний діапазон і обчислюється значення показників K_Y та K_X . Ланцюжки подій пов'язані між собою своїми причинно-наслідковими зв'язками в єдиній екосистемі, що робить їх впізнаваними, а розрахунок зміни ентропії для кожної з них цілком передбачуваним.

Така модель може бути легко представлена у вигляді послідовного орграфу (рис. 2), де вершини (qj) є відображенням деяких *передбачуваних* подій (j) або *здійсненої* події «00» на кожному q – рівні прогнозованого інтервалу часу в майбутньому, по відношенню до сьогодення, а ребра графа - причинно-наслідкові зв'язки, які послідовно перетворюють одну j – ту причину в іншу, функціонально порівнянну з нею. Виділимо три складові:

- очікувані події (чотири рівні в часовому інтервалі майбутнього на рис. 2);
- інтервал подій між потенційними і реальними подіями ($\delta\tau \rightarrow 0$);
- область події що відбулася на цей час T_n .

Найнижчий, перший рівень подій показує нам саме біфуркацію, наприклад, у вигляді катастрофи збірки, коли в проміжку часу $\delta\tau$ залишаються тільки три ще невизначених варіанти подій: 11, 12, 13, і тільки одна з них, а саме 12-та подія, стає фактично здійсненою вже в момент $\delta\tau$ у теперішньому часі (див. рис. 2). Ланцюжок передбачуваних подій, що призвели до ризику що здійснився - «00», виглядає наступним чином: $00 \leftarrow \widetilde{(12)}^I \leftarrow \widetilde{(23)}^{II} \leftarrow \widetilde{(34)}^{III} \leftarrow \widetilde{(34 \rightarrow 36)}^{III} \leftarrow \widetilde{(44 \rightarrow 46 \rightarrow 48 \rightarrow 49)}^{IV}$.
Всі інші можливі події, в даному випадку, не привели до реального результату, події «00».

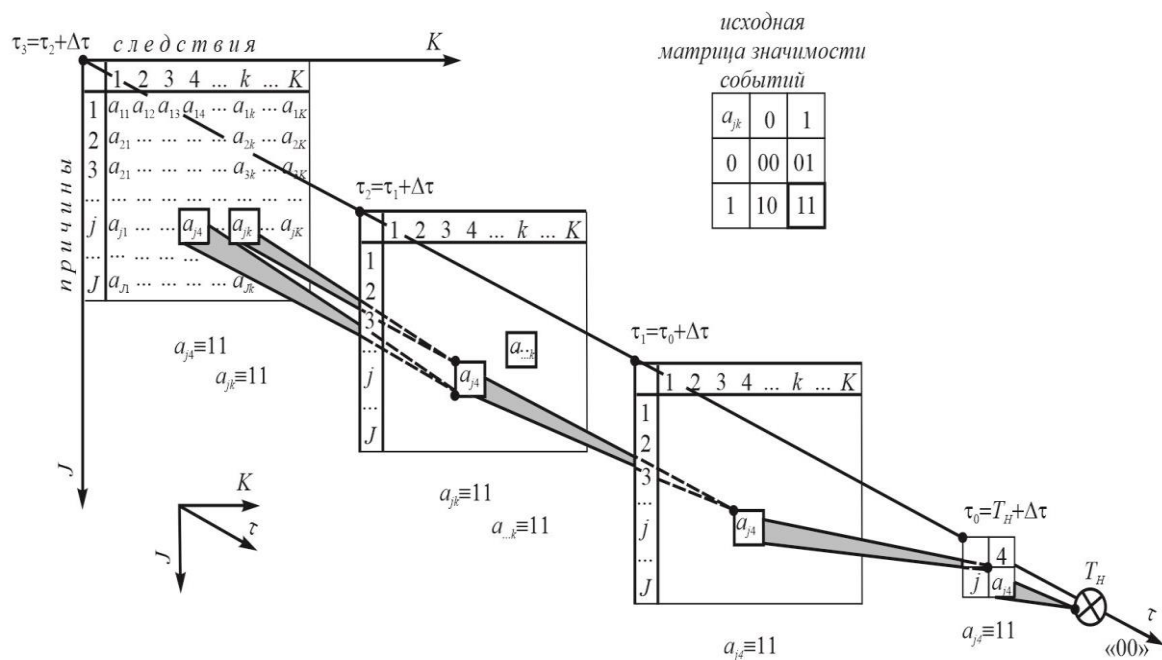


Рисунок 3 – Динамічні матриці причинно-наслідкових зв'язків для оцінки реальної ризикової події «00» в заданому часовому інтервалі.

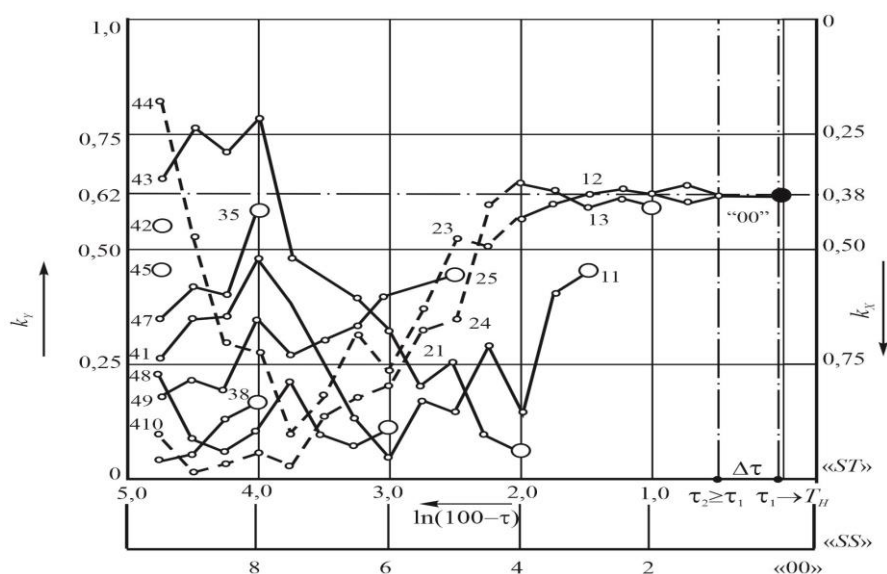


Рисунок 4 – Взаємодія та взаємозв'язки в динаміці змінних показників упорядкування ентропії шкалах «ST» та «SS» відповідно

Причинно-наслідкові взаємодії подієвих процесів легко простежити в кожному конкретному (i – ому) одномиттєвому матричному режимі (рис. 3) у вигляді елементів матриці a_{jk} , де: j – порядковий номер причини настання події, k – порядковий номер наслідку, що є підставою для події. Як впливає з таблиці (рис. 3), кожному причинно-наслідковому зв'язку може бути присвоєний певний маркер, що складається з нулів і

одиниць і відображає відповідність даної події певним умовам. Значення матриці для деякого значення $\tau_i = const$ повністю зберігається, тому що вона має часову складову, яка відокремлює вміст кожного i – го елемента матриці в своєму часовому інтервалі τ_i . В результаті така матриця дає уявлення про єдину подію, яка буде реальною з передбачуваного майбутнього через проміжок часу, наприклад $3\Delta\tau$. Протягом цього проміжку часу з усіх можливих $a_{j,k}$ – их подій ризикоутворююча подія $a_{j,4}$ буде реалізовано як таку, що реально відбулася.

Динаміка відносного значення зміни ентропії окремих подій (рис. 2) від хаотичного до впорядкованого стану простежується, зокрема, по наступних ланцюжках: $44 \rightarrow \dots \rightarrow 23 \rightarrow 12 \rightarrow "00"$. Вони призводять до однозначної події «00», що має властивості об'єктивного ризику. При цьому обране значення індексу впорядкованості дорівнює $K_Y = 0,62$. У цих же відносинах був ще один ланцюжок передбачуваних подій: $410 \rightarrow 24 \rightarrow 13$. Однак він, як і всі інші ланцюжки, що представлені на рис. 2 не призвели до формування реального ризикоутворення через явно нестабільне значення коефіцієнта K_Y . Загальний висновок полягає в тому, що ентропія як міра упорядкованості або невпорядкованості подієвої інформації може представляти варіант презумпціонізму в причинно-наслідкових відносинах між подіями, які передують виникненню реального екологічного ризику.

Висновок

Представлено альтернативний метод оцінки та прогнозування екологічних ризиків для того чи іншого явища. Ризик висвітлюється через послідовність подій, кожна зі своєю енергією та інформацією, які призводять до ризикових результатів. Оцінка таких ризикоутворюючих подій проводиться на основі міри розсіювання енергії або інформації, що є індивідуальними для кожного з прогнозованих подій, і робить їх відмінними серед інших.

Література

1. Волошин В. С. Ризик. Альтернативні методи аналізу. Київ. ФОП Семченко. 2024. - 490 с.
2. Entropy and Risk in Economic and Social Systems. *Springer*. №11(642). 2022. 251-270 p.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Єлістратова Н. Ю., ст. викладач,

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА

Технології виробництва хліба беруть свій початок разом з аграрною революцією, яка була призвана створити нове людське суспільство, і хліб тут зіграв не останню роль. Тому вивчення особливостей утворення відходів у такій традиційній технології має бути повчальним для сучасних фахівців.

Основні сировинні компоненти сучасної технології виробництва хліба у вигляді $(J_0 + J_w)$, де J_0 та J_0 -частини матеріального потоку сировини, з якої створюється товарна продукція сучасного технологічного процесу виробництва хліба і її відходи, представлені в таблиці 1. Тут же представлені основні параметри, необхідні для вивчення особливостей термодинамічного стану виробничої системи, основи яких викладені у вигляді наведеної нижче методики дослідження.

Приймаючи до уваги всі ключові етапи процесу, тепловий баланс у хлібопекарній технології можна виразити наступним чином:

$$E_0 = A_0 + \Delta U + \Delta Q_w,$$

де E_0 – зовнішня енергія, що надається у технологічний процес (кДж/кг сировини);

A_0 – корисна робота, що створюється при виробництві хліба (кДж/кг сировини);

ΔU – зміна внутрішньої енергії технологічного процесу (кДж/кг сировини);

ΔQ_w - безповоротні втрати енергії (кДж/кг сировини).

Корисна робота A_0 відображає зміни, які відбуваються в кінцевому продукті, хлібі, і можуть бути виміряні. Вона включає в себе роботу, витрачену на підвищення температури тіста, зміну його структури (трансформації клейковини і газів), а також на зміну фізичних і хімічних властивостей хліба в процесі випічки [2].

Внутрішня енергія ΔU технологічного процесу складається з енергії, завдяки якій стаються екзотермічні фізико-хімічні зміни: утворення клейковини, термічні процеси

перетворення крохмалю, реакцію Майяра, утворення скоринки, тепловий ефект реакції бродіння. Ця енергія також витрачається на зміну температури і стану тіста, випаровування води та інші хімічні реакції, що відбуваються в процесі випічки [2].

При наданні в систему додаткової енергії E_w ми не приймаємо до уваги що внутрішня енергія системи при цьому також змінюється, тобто залишаємо $\Delta U = \text{const}$ и запишемо, що $E_0 + E_w \geq \Delta U + (A_0 + A_w)$. Але тут параметр A_w вже означає роботу, що виконана для того, щоб перевести матеріальний потік J_w , з якого раніше отримували відхід, в максимально можливий товарний стан, тобто, в певну корисну продукцію.

Узгоджений феноменологічний показник λ у рівнянні Л. Онсагера загального виду $\frac{\Delta S}{E_0} = \frac{J_0 X_0 + J_w X_w}{E_0} \lambda (1 - \lambda)$ [1] запишемо у вигляді $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$.

Враховуючи принцип взаємності Онсагера для системи в стані, близькому до термодинамічної рівноваженості у відносності частин сировини J_0 і J_w , а також встановлене відношення $A_w/A_0 \approx 0,62$, показник λ представимо, як

$$\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w} = \frac{A_0/J_0}{A_0/J_0 + A_w/J_w} = \frac{J_w}{(0,62J_0 + J_w)},$$

що буде відповідати вже тому стану сировини J_w , яка буде в майбутньому отримувати зміни, що пов'язані з впливом енергії E_w в термодинамічному нерівноважному стані. При цьому $\lambda \leq 1,0$ та наближається до одиниці, вказуючи на область теоретично обґрунтованого мінімального утворення відходів.

Таблиця 1 – Опосередковані аналітичні дані для дослідження процесів утворення відходів при різних способах виробництва хліба

№№ п/п	Параметр	Значення параметру
Структура вихідної сировини ($J_0 + J_w$) (% від сумарного)		
1	Борошно пшеничне	60
2	Вода	35
3	Дріжджі	1÷2
4	Сіль	1÷1,5
5	Цукор, жири, молочні продукти, штучні розпушувачі та ін.	до 3,0
	РАЗОМ:	100

Відходи (J_w) (кг/тонну сировини)			
	Назва відходу	Кількість, кг/т вихідної сировини	Енергетична цінність втрат, кДж/кг відх. сировини
	Борошно, що не використано в технологічному процесі	50÷100	120
	Борошняний пил	5÷ 10	80÷90
	Залишки води з тіста (випарювання)	20÷ 30	330
	Хімічні добавки, зокрема, дріжджі	15÷20	50 ÷ 120
	Тісто, яке не підійшло для випічки (брак)	50÷ 80	150÷220
	Підсушений і зіпсований хліб	85÷ 150	120÷ 280
	Відходи упаковки (пластик, картон))	30÷ 50	-
	РАЗОМ:	225-390	-
	Сумарні енергетичні втрати:	-	850÷1160
Енергетичні витрати (кДж на 1 кг сировини)			
	Зовнішня вхідна енергія (E_0), включаючи: -енергію, що витрачається на ферментацію та на нагрівання тіста в процесі замісу – -енергію, що необхідна для замісу тіста – -енергію, що необхідна для нагрівання тіста – -енергію, що витрачається на випарювання води -енергію для адсорбції води крохмалем – -енергію необхідну на створення клейковини – -енергію, що втрачається у вигляді відходу –	1650÷2200 60÷100 100÷150 500÷600 80÷100 50÷70 10÷20 850÷1160	
	Корисна робота щодо зміни сировини до кінцевого продукту (A_0)	~500	
	Зміна внутрішньої енергії в системі (ΔU)	~650	
Енергетичні втрати (ΔQ_w) (кДж на 1 кг сировини)			
	Теплові втрати на етапах: - приготування тіста і заміс – - ферментації (бродиння) – - формування тіста – - випічки– - охолодження хліба – РАЗОМ:	70÷80 80÷100 50÷60 470÷670 180÷250 850÷1160	

Методика дослідження. Методика досліджень включає виявлення значень базових термодинамічних коефіцієнтів у послідовності технологій, що відносяться до виробництва хліба, не залежно від їх типу, якості та належності. У дослідженні приймається тільки традиційна технологія виготовлення хлібу шляхом термообробки тіста, що було попередньо приготовлено з урахуванням поліпшених органолептичних

та фізико-хімічних властивостей, зокрема, гідратаційних, ферментаційних, теплових та інших здібностей вихідної сировини.

Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність про:

- величину зовнішньої енергії E_0 , що надходить у технологічний процес для переробки сировини на одиницю її маси;

- температурні параметри T_i власне технологічного процесу та зовнішнього середовища T_0 для розрахунку зміни ентропії;

- параметри сировини, яка підлягає переробці у конкретному технологічному процесі, а саме:

- параметр матеріального потоку J_0 , який витрачається на отримання основної товарної продукції;

- параметр матеріального потоку J_w , який становить весь первісний обсяг сировини у своїй відходоутворюючій частині;

- запропоновану величину додаткової зовнішньої енергії $E_w \leq kE_0$ обраної якості, яка може дозволити вивести матеріальний потік J_w зі стану близького до термодинамічної рівноваги до нерівноважного стану;

Розрахунку підлягали показники:

- величина термодинамічної сили X_0 , що забезпечує цілеспрямовану зміну матеріального потоку J_0 до стану товарної продукції;

- величина необхідної термодинамічної сили X_w , яка здатна змінити матеріальний потік J_w до максимальної можливості корисної продукції, у відповідності до типу технологічного процесу;

- зміна ентропії системи, залежно від стану її невірноваженості, відповідно до відомих рівнянь Л. Онсагера, теореми І. Пригожина та ін.

- зміна наведеної ентропії системи $\Delta S/E_0$ залежно від феноменологічного показника $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$ з подальшим виявленням його параметрів на кожному наступному n -му етапі ітерації.

Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою програмного пакету *Statistica 6.0*. (StatSoft, Inc., США).

Термодинамічні сили в рівнянні Л. Онсагера можна виразити через макроскопічні параметри системи. У нашому випадку ми будемо враховувати тільки термодинамічні сили $X_T = -\frac{1}{T} \nabla T$ (K^{-1}), що викликані температурним градієнтом ∇T .

Діаграма для оцінки теоретично обґрунтованого мінімуму відходів, що відносяться до технології промислового виробництва хліба, надана на рис. 1, а).

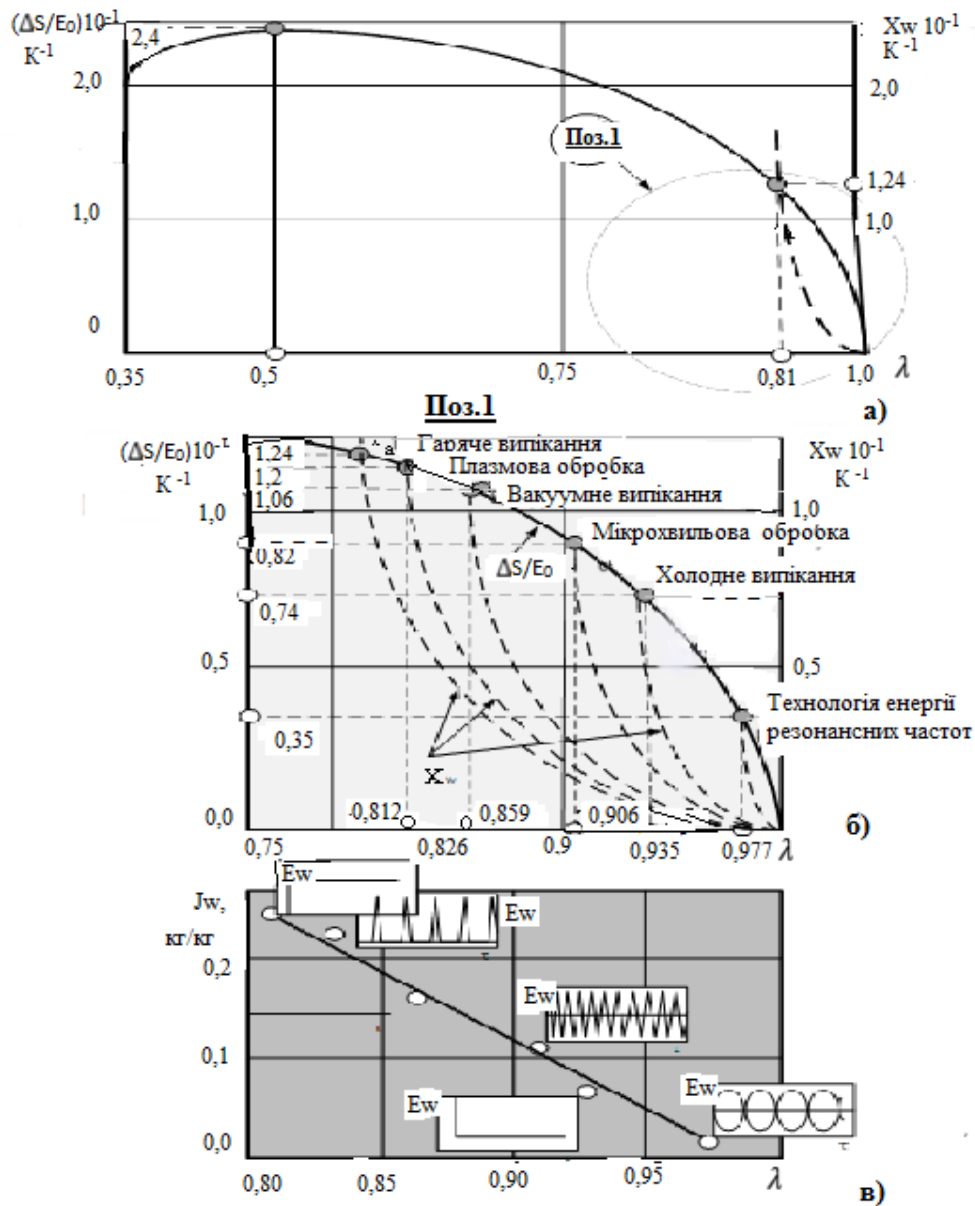


Рисунок 1 – Схема для розрахунку та розрахункові дані щодо теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва хліба. Тут:

- а) - позиція теоретичного мінімуму відходів в технології виробництва хліба;
- б) - розрахункові дані (п. 1) щодо виявлення фактичного відходоутворення для різних технологій виробництва хліба; в) – залишкові відходи J_w^0 виробництва хліба при використанні модифікованої енергії E_w^0 різних типів

Велике значення для максимальної кількості у зміні інтегральної ентропії (відносне значення $\frac{\Delta S_{\lambda=0.5}^{max}}{E_0} = 0,24 \text{ K}^{-1}$ для $\lambda = 0,5$) на феноменологічній кривій Л. Онсагера, порівнюється з відносно невеликими значеннями цього показника в області

отримання відходів (точка «а» на рис. 1). Вона показує, що зміна стану термодинамічної рівноваженості для тієї частини сировини J_w , з якої зазвичай виходять відходи, вимагає особливих умов для отримання додаткової зовнішньої енергії E_w , при яких термодинамічна сила не повинна перебільшувати значення $X_w \leq 1,24 \cdot 10^{-1} K^{-1}$ для $\lambda \geq 0,81$, щоб не порушити умови отримання основної товарної продукції

Це може бути як модифікована базова енергія E_0^w , що здатна впливати й на компоненти сировини J_0 , і на компоненти J_w , так і додаткова енергія спеціальної якості E_w , що здатна забезпечити або підвищені когезійні якості напівфабрикату, або виключити рівні можливості для температурної обробки різних сировинних компонентів при яких $\lambda \rightarrow 1,0$.

Таким чином, з викладеного про утворення відходів в технологічному процесі виробництва хліба має бути наступне.

1. Матеріальні витрати в кількості 39% сировини (див. таблицю 1) при $\lambda \geq 0,81$ - це харчові відходи, які практично повністю утилізуються поза технологічним процесом отримання хліба і не представляють додаткового інтересу. Вони включають компостування (80-90% хлібних відходів), корми для тварин (60-70%), виробництво біогазу (50-60%), харчові добавки та продукти переробки (30-40%), термічну утилізацію (10-15%) та виробництво біопластику (5-8%).

2. У номенклатурі енергетичних відходів переважають теплові втрати (36-58% від енергії, що використовується), які неминучі в умовах переважно теплових процесів в технічних системах. Для того щоб мінімізувати їх в межах самого технологічного процесу, за принципом термодинамічної двоєдності [3], необхідно ввести в технологічний процес або додаткове джерело енергії $E_w \sim 0,62 E_0$, або модифіковану базову енергію E_0^w ,

Таблиця 2 – Розрахункові дані для аналізу ефективності технологій виробництва хліба щодо мінімізації відходів за умови постачання в систему модифікованої енергії E_0^w

№№ п/п	Найменування та особливості технологічного Процесу	Вид показника			
		T, К	λ , од.	$\Delta S/E_0$, K^{-1}	ΔQ_w , кДж/кг
1	Гаряча випічка	473-523	0,812	$1,24 \cdot 10^{-1}$	850-1160
2	Холодна випічка	320-330	0,935	$0,74 \cdot 10^{-1}$	200-400
3	Вакуумна випічка	390-410	0,859	$1,06 \cdot 10^{-1}$	300-520
4	Мікрохвильова обробка	350-450	0,906	$0,82 \cdot 10^{-1}$	450-700
5	Плазмова обробка	800-950	0,826	$1,2 \cdot 10^{-1}$	800-1200
6	Технологія енергії резонансних частот	320-370	0,977	$0,35 \cdot 10^{-1}$	150-200

Прикладом використання таких видів енергії в промисловому виробництві хліба можуть служити вже відомі технології (див. рис. 1, б), описані А. Ханом, Дж. Смитом, П. Тейлором, М. Джонсоном, М. Финчем (2001-2020), зокрема:

-холодної випічки, яка передбачає використання хімічних розпушувачів, які у взаємодії з кислотою сприяють виділенню вуглекислого газу, що піднімає тісто.

Розрахункове значення $\lambda \leq 0,935$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,74 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$;

-вакуумної випічки, при якій тісто нагрівається в умовах зниженого тиску, що значно знижує температуру випаровування води з тесту, і прискорює цей процес ($\lambda \leq 0,859$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 1,06 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$);

-мікрохвильової обробки з використанням височастотних електромагнітних хвиль для нагрівання, а потім «приготування» тіста. Швидкість випікання становить кілька хвилин при $\lambda \leq 0,906$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,82 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$;

-плазмової імпульсної обробки з використанням імпульсного плазмового генератора для обробки тіста, що дозволяє нагрівати хліб до потрібної температури без традиційних печей ($\lambda \leq 0,826$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 1,16 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$).

Свого дослідження чекає технологія використання енергії резонансних частот щодо власних частотних властивостей сировини (борошна, вологи в тесті та ін.).

Використання резонансних явищ між компонентами сировини і основною модифікованою енергією впливає на всі стадії технологічного процесу, на відміну від інших способів випічки хліба, наприклад, індукційний метод впливає тільки на випічку, холодний спосіб впливає, в основному, на процеси бродіння і гідратації і т. д. У технологіях виробництва хліба резонансний нагрів та обробка, наприклад, може використовуватися, у тому числі, для прискорення таких процесів, як желатинізація крохмалю, гідроліз і поліпшення реологічних властивостей тіста.

Використання резонансних явищ в системах виробництва хліба може бути дуже енергоефективним методом, враховуючи, що в цілому це маловідходне виробництво має основне джерело відходів у вигляді втраченої теплової енергії з втратами близько 1000 кДж/кг сировини, і навіть при використанні сучасних індукційних або інфрачервоних систем енергозабезпечення для спікання хліба - втрати досягають 400-700 кДж/кг сировини. У цьому ряду навіть розрахункові значення можливих втрат енергії при використанні резонансних технологій отримання випічки хліба можуть давати сумарні втрати тепла $\Delta Q_w \leq 120$ кДж/кг використовуваної сировини при

значеннях $\lambda = 0,977$ і більш, при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,35 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$ (див. рис. 1, в), тобто наближення до теоретичного мінімуму утворення відходів у самому джерелі – технологічному процесі.

Безумовно, для такої давньої і розвиненої технології, як виробництво хліба, вже відомі джерела модифікованої основної енергії, в основі якої лежить теплова обробка, можуть надати вирішальний вплив на мінімізацію як матеріальних (органічних) відходів, так і втрат енергії. Сучасні джерела енергії: низькотемпературні, високочастотні нагрівачі, імпульсні джерела енергії вже показали свої результати (див. рис. 1, в). Тим не менш, ресурси в самому технологічному процесі дозволяють розраховувати на можливість наближення до теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів, в тому числі і теплових втрат.

Висновки

Незважаючи на те, що сучасні технології виробництва хліба відрізняються відносно невеликою кількістю органічних відходів, які максимально утилізуються після їх створення, максимальним у виробництві є тепловий відхід, що безповоротно втрачається в технологічному процесі. Посилаючись на теоретично обґрунтований мінімум утворення відходів, запропонований метод введення модифікованої енергії резонансних коливань в технологічний процес дозволяє не тільки на порядок знизити втрати теплової енергії, але й за рахунок резонансних взаємодій з молекулами сировинної води знизити втрати органічних відходів до максимально можливих 3% від сировини, що використовується в технології.

Література

1. Nielsen, S. S. Food Analysis, 5th edition, 2017, Springer, 784 p.
2. Волошин В. С., Бурко В. А. The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes. Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society. Scientific monograph. Riga, Latvia. Baltija Publishing. 2024. P. 32-53.
3. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 2024. 630 с.

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

Ткаленко І. Ph.D., техн. директор

компанія AMCOM GROUP LLC, США.

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВЗАЄМОДІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ ПРИ ЇХ РЕЦИКЛІНГУ

Тверді металургійні відходи – шлаки, шлами, металургійний пил займають значну нішу мінеральних промислових втрат, обсяги яких у всьому світі не тільки не зменшуються, але й мають тенденцію до систематичного збільшення [1]. Одним з ефективних способів мінімізації твердих металургійних відходів є їх комплексна переробка і пов'язані з ними нові матеріали, сировинні та металізовані брикети, суміші, в'язучі речовини і заповнювачі [2, 3, 4]. Залежно від їх складової можна отримати широкий асортимент нових продуктів, які мають свою товарну цінність і використовуються в різних галузях сучасної промисловості [5].

Будь-який технологічний процес орієнтований на отримання певної корисної продукції. Відходи є неминучою складовою таких процесів і являють собою продукт з невпорядкованою структурою або апіорі незмінними властивостями деяких компонентів сировинної бази технологічного процесу. Тоді одержуваний товарний продукт від цього технологічного процесу є певною впорядкованою частиною сировини, з якої її отримують. Мірою невпорядкованості таких систем є їх ентропія або зміна ентропії в залежності від прийнятих дій. Аналогічний підхід в іншому тлумаченні був описаний в роботі [6].

Систематизуємо 12 найбільш типових металургійних відходів, які складають значну частку всіх промислових відходів, що зберігаються на Землі, і які ляжуть в основу наших подальших досліджень (таблиця 1).

Таблиця 1 – Маркування і ентропія для основних металургійних відходів, прийнятих в роботу.

№№ (р)*	Назва відходу	Означення відходу	Ентропія S_p , у.е.
1	Доменний шлам	b_1	4,0
2	Конвертерний шлам	b_2	3,9
3	Доменний (колошниковий) пил	b_3	3,8
4	Конвертерний пил	b_4	3,7

5	Електросталеплавильний пил	b_5	3,6
6	Конвертерний шлак	b_6	2,7
7	Електросталеплавильний шлак	b_7	2,6
8	Доменний шлак	b_8	2,5
9	Електросталеплавильна окалина	b_9	1,9
10	Конвертерна окалина	b_{10}	1,8
11	Мельнична окалина	b_{11}	1,8
12	Прокатна окалина	b_{12}	1,7

*) надалі в індексації відходів приймається що $p \sim q \sim r \sim t$

Для кожного відходу b_p , де: $p = 1,1,12$, визначається величина ентропії $S_p = S_q$, як показник неупорядкованості системи, де $q = 1,1,12$ – значення q -го відходу, як відповідна реакція на взаємодію з p – м відходом. Кожна взаємодія порівнюється зі зміною ентропії $\Delta S_{p,q}$ при парній взаємодії металургійних відходів, виходячи з їх фізико-хімічних і механічних та термічних властивостей. Для моделювання трьох- або чотирьохкомпонентних брикетів за їх складом беремо за основу матрицю суміжності відповідного формату - з двох-, трьох-, або чотирьохкоординатної p, q, r, t – сіткою (рис. 1 і рис. 2).

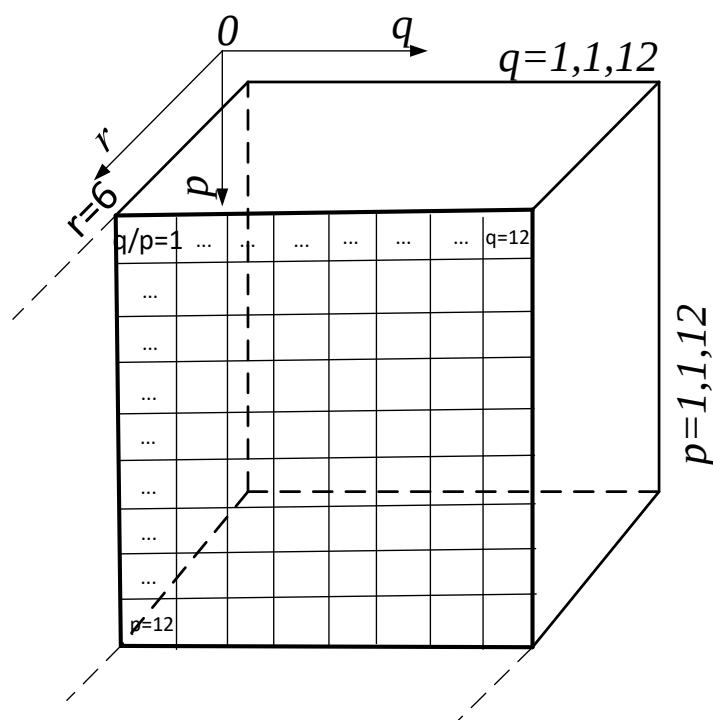


Рисунок 1 – Графічна модель матриці суміжності для 12 металургійних відходів в розрізі з $r = 6$.

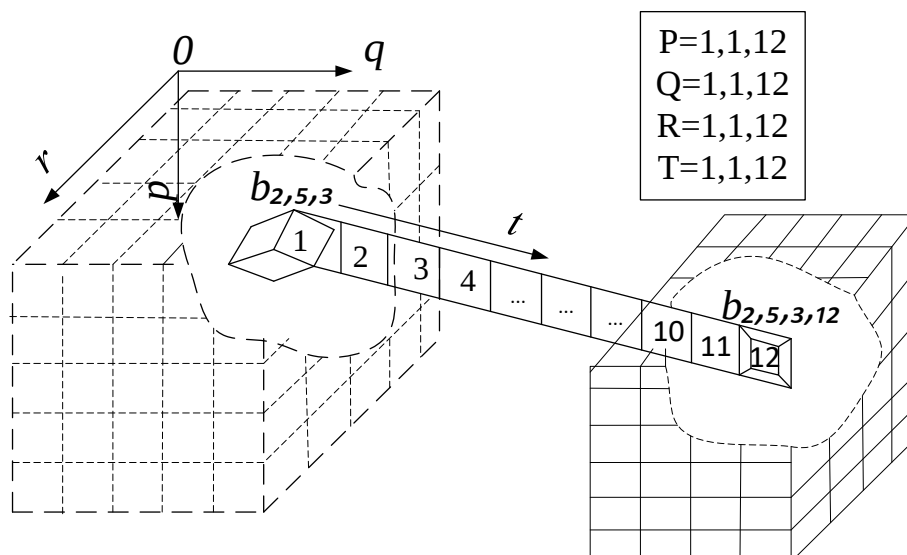


Рисунок 2 – Модель чотирьохкомпонентної чотиривимірної матриці суміжності для 12 типових металургійних відходів та ілюстрація моделі брикету, яка прийнята за стандарт з формулою взаємодії $b_{\text{брик}} = b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$.

Як випливає з даних (рис. 3), існує досить чітка градація багатокомпонентних металургійних відходів як сировини для товарних продуктів за їх ефективністю. Наприклад, у залежності від хімічного і гранулометричного складів, наявності в сумішах в'язучих речовин ефективність двокомпонентних сумішей на основі шламу, пилу або окалини не може перевищувати 60% від початкової кількості прийнятих металургійних відходів. Для трикомпонентних виробів цей «ккд» досягає вже 60-80%, а для чотирьохкомпонентних - понад 90%.

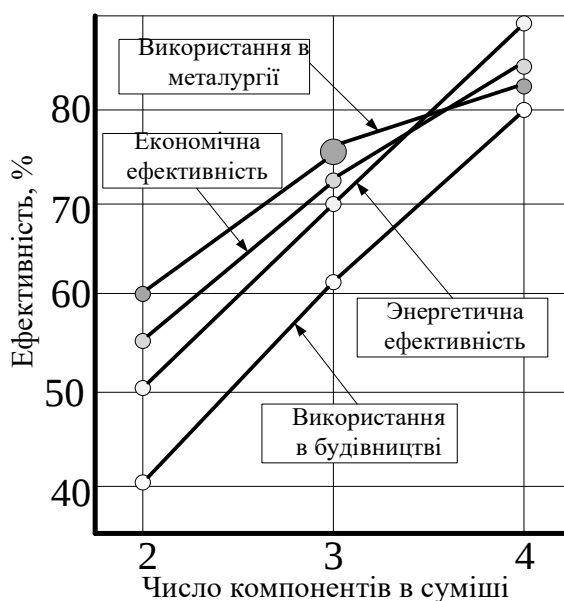


Рисунок 3 – Ефективність використання перероблених багатокомпонентних металургійних відходів.

Матриця суміжності дозволяє оцінити, чи зможуть двійки відходів з індексами p та q взаємодіяти для отримання товарної продукції як безпосередньо, так і з використанням додаткових матеріалів. Взаємодії умовно оцінюються на основі фізико-хімічної сумісності (наприклад, хімічний розподіл і гранулометричний склад, реакційна здатність) і задокументованих процесів рециклінгу. Знак «+» у двокомпонентній матриці виду вказує на можливу взаємодію, що веде до корисного продукту (наприклад, цементу, заповнювачів або відновлення металу), а «-» вказує на відсутність відомої або іншої практичної взаємодії через несумісні властивості або відсутність процесів.

/q	$\Delta S_{p,q}$											
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
b_1		1,55	1,74	1,61	1,58	2,09	2,05	2,01	1,82	1,77	1,75	1,78
b_2			1,59	1,55	1,52	1,91	1,89	1,88	1,74	1,75	1,71	1,69
b_3				1,48	1,54				1,64	1,61	1,59	1,59
b_4					1,44	1,81	1,79	1,78	1,65	1,63	1,60	1,59
b_5						1,75	1,72	1,69	1,54	1,54	1,51	1,49
b_6							1,33	1,29	1,16	1,14	1,11	1,09
b_7								1,21	1,13	1,11	1,10	1,10
b_8									1,12	1,12	1,10	0,9
b_9										0,85	0,83	0,81
b_{10}											0,77	0,71
b_{11}												0,70

В якості попереднього результату ентропія кінцевого продукту в цьому дослідженні була розрахована за допомогою непрямих і корелятивних оцінок. Для розрахунку використовувалася спрощена модель Шеннона, адаптована під хімічну та структурну складність компонентів: $S_i = -\sum P_j \ln P_j + S_{\text{структ.}}$, де: P_j — імовірність знаходження компонента j (оцінюється, наприклад, за часткою основних оксидів або

металів) у відходах; $S_{\text{структ.}}$ — внесок ентропії від фазового стану і розміру частинок (оцінюється якісно) для j -го компоненту.

Зміна ентропії системи по відношенню до взаємодії двох відходів визначається як $\Delta S_{p,q} = S_{\text{прод.}} - (S_p + S_q)$ де: $S_{\text{прод.}}$ — ентропія результуючої системи після взаємодії, яка оцінюється виходячи з характеру і числа взаємодій, а також властивостей продукту; S_p і S_q — стандартна ентропія окремих відходів. Якщо в результаті взаємодії утворюється впорядкована система (наприклад, кристалічний продукт, агломерат), то $\Delta S_{p,q} < 0$. Якщо продукт залишається неупорядкованим (наприклад, аморфний шлак), то $\Delta S_{p,q} \rightarrow 0$ або злегка позитивний.

Двовимірна матриця суміжності для $b_{p,q}$ показує, що переважна більшість двійок відходів b_p, b_q може взаємодіяти з утворенням цінних продуктів, таких як цемент, метали, заповнювачі, шлакові ситалії та добрива. Але ефективність їх не велика. Найбільш значна зміна ентропії для одержуваного продукту спостерігається при взаємодії сильно неупорядкованих відходів (пил, шлак) з упорядкованими відходами (окалиною, шлаком).

Далі ми розглянемо багатоконпонентні (в даному випадку чотирьохконпонентні) взаємодії металургійних відходів для створення стандартних і альтернативних брикетів. Такий підхід, заснований на переробці комплексу неорганічних відходів, дає більше можливостей для пошуку прийнятних варіантів отримання товарної продукції [7]. Метод заснований на аналізі трикомпонентної матриці суміжності b_p, b_q, b_r (див. рис. 1) з розширенням її до чотирьохконпонентної матриці b_t, b_p, b_q, b_r шляхом відображення параметрів, необхідної для аналізу комірки трикомпонентної матриці суміжності з параметрами b_p, b_q, b_r та визначення її суміжності щодо компоненти b_t ($t = 1,1,12$) (див. рис. 2). Як і раніше, за показник ефективності використання металургійних відходів ми беремо динамічні зміни ентропії як фактор, що визначає не тільки стабільність, але і конструкційні властивості одержуваного продукту, в даному випадку брикетів.

Для стандартного складу брикету $(b_2 + b_5 + b_3 + b_{12})$ і обчислюються альтернативні комбінації: зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t} = S_{\text{прод.}} - (S_p + S_q + S_r + S_t)$, де $S_{\text{прод.}}$ — ентропія брикету (оцінюється в 1,5 у.о. за аналогією з цементно-зв'язаним агломератом), а також сумарна ентропія $S_{\text{повн}} = S_p + S_q + S_r + S_t$.

Нижче представлений фрагмент матриці, що включає складову стандартного брикету і його альтернативні варіанти, які забезпечують аналогічні, або інші

властивості. Повна матриця (12x12x12x12) досить велика для ілюстрації, тому її ключові комірки покажемо так:

$b_{p,q,r}$	$b_{p,q,r,t}, \Delta S_{2,5,3,12}$			
	$b_2/b_5/b_3$	$b_2/b_5/b_1$	$b_2/b_3/b_1$	$b_5/b_3/b_1$
$b_2/b_5/b_3 \quad (t=1)$	-	+(-2,5)	+(-2,5)	+(-2,5)
$b_2/b_5/b_1 \quad (t=1)$	-	-	-	+
$b_2/b_3/b_1 \quad (t=1)$	+	+	-	-
$b_5/b_3/b_1 \quad (t=1)$	+	+(-2,4)	+(-2,4)	-
...	...	...	...	...
$b_{p,q,r}, \quad t=1 \div 12$	-	-	-	-
...	...	...	...	...
$b_2/b_5/b_1 \quad (t=12)$	-	-	+(-2,3)	+(-2,2)
...	...	...	...	...
$b_2/b_3/b_1 \quad (t=12)$	+	+(-2,3)	-	+(-2,0)
...	...	...	...	...
$b_2/b_3/b_1 \quad (t=10)$	-	+(-2,2)	-	+(-1,9)
...	...	...	...	...
$b_2/b_5/b_3 \quad (t=12)$	-	+(-2,2)	+(-2,1)	+(-2,1)
...	...	...	...	...
$b_5/b_3/b_1 \quad (t=12)$	+(-2,1)	+(-1,9)	+(-1,8)	+(-1,4)
...	...	...	...	...
$b_5/b_3/b_1 \quad (t=11)$	+(-2,0)	+(-1,8)	+(-1,5)	-

Альтернативні комбінації в матриці засновані тільки на структурних варіантах і отриманих завдяки цьому нових властивостях готового продукту (брикету). Визначаються види відходів, що дозволяють отримати брикет зі схожими властивостями, виходячи зі складу і технології брикетування.

Розглянемо стандартний брикет, що має чотири складові b_2, b_5, b_3, b_{12} . Його формула: $b_{\text{брик}} = b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$ включає конвертерний шлам, електросталеплавильний та доменний пил і прокатну окалину. Ентропія компонентів ($S_2= 3.9$), ($S_5= 3.6$), ($S_3= 3.8$), ($S_{12}= 1.7$). Повна ентропія системи, включає параметри всіх компонентів $S_{\text{повн}} = 13.0$ у.о.

Ентропія отриманого брикету: $S_{\text{брик}}=1.5$ у.о. (попередньо, ентропійний аналог цементно-зв'язаного агломерату). Зміна ентропії системи: $\Delta S_{2,5,3,12} = S_{\text{брик}} - (S_2 + S_5 + S_3 + S_{12}) = 1.5 - (3.9 + 3.6 + 3.8 + 1.7) = 1.5 - 13.0 = -11.5$ у.о.

Властивості брикетів.

Механічна міцність поділяється на міцність на стиск ≥ 20 МПа, ударну в'язкість $\geq 90\%$ (барабанне випробування), завдяки цементній зв'язці (8-10%) і коксовому відсіву, який забезпечує вуглець для відновлення. Умовою температурної стійкості є стійкість брикету до температурних деформацій в межах 700–1000 °С за рахунок оксидів заліза (Fe_2O_3) у складі окалини та пилу, а також вуглецю в b_3 , що запобігає розкладанню при відновленні. Хімічний склад характеризується високим вмістом Fe (50-60% з окалини та пилу), вуглецю (5-10% від b_3 і коксу), CaO (2-5% від b_2 , Zn і Pb (видаляється при плавленні). Умовний технологічний процес включає змішування компонентів стандартного брикету b_2, b_5, b_3, b_{12} з відсівом коксу (5-10%) і цементної зв'язки (8-10%), пресування під тиском 10-15 МПа (вібростиснення), сушку при 150-500 °С. Брикети можуть використовуватися в доменній плавці для відновлення заліза.

Альтернативні комбінації для нестандартного брикету, які є предметом пошуку за допомогою чотиривимірної матриці суміжності, повинні відповідати умовам аналогізації їх властивостей зі стандартним брикетом (механічна міцність ≥ 20 МПа, температурна стійкість до 700–1000 °С, хімічний склад з високим вмістом заліза та вуглецю).

Таблиця 2 – Варіанти компонентності та термодинамічні характеристики альтернативних брикетів.

Компоненти брикету	Формула для $b_{\text{брик}}$	$\Delta S_{\text{повн}}, \text{ у.о.}$		$S_{\text{повн}}, \text{ у.о.}$
		$\Delta S_{2,5,3,12}$	$\Delta S_{p,q,r,t}$	
Конвертерний шлам Електросталеплавильний пил Доменний шлак Електросталеплавильна окалина	$b_2 + b_5 + b_1 + b_9$	-11,5	-2,1	13,4
Конвертерний шлам Доменний пил Доменний шлак Конвертерна окалина	$b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$	-11,5	-2,3	13,5
Електросталеплавильний пил Доменний пил Доменний шлак Мельнична окалина	$b_5 + b_3 + b_1 + b_{11}$	-11,5	-1,5	13,0
Конвертерний шлак Електросталеплавильний пил Доменний шлак Прокатна окалина	$b_2 + b_5 + b_1 + b_{12}$	-11,5	-2,2	13,3
Конвертерний шлак Доменний пил Доменний шлак Прокатна окалина	$b_2 + b_3 + b_1 + b_{12}$	-11,5	-2,3	13,4

Підбираються комбінації, які замінюють один або кілька компонентів стандартного брикету, але зберігають синергетичний ефект за рахунок зниження ентропії системи в цілому. Термодинамічні характеристики альтернативних брикетів представлені в таблиці 2.

Заміна b_3 (доменний пил) на b_1 (доменний шлам) зберігає високий вміст вуглецю і заліза, але забезпечуючи міцність і відновлювальні властивості брикету. Заміна b_{12} (прокатна окалина) на b_9, b_{10}, b_{11} (інші окалини) підтримує високий вміст Fe_2O_3 в брикеті (70–80%), необхідний для доменної плавки.

Комбінації можуть включати шлам або пил b_1, b_2, b_3, b_5 для вуглецю, та окалину $b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}$ для вмісту заліза, що забезпечує аналогічний хімічний склад (Fe 50-60%, C 5-10%).

Альтернативні брикети (див. табл. 2) повинні мати $\Delta S_{p,q,r,t} < -11.5$ у.о. співставлену для всіх комбінацій (початкова умова порівнянності), оскільки $S_{\text{брик}} = 1.5$ у.о, а $S_{\text{повн}}$ змінюється від 13,2 до 13,5 у.о. за рахунок заміни компонентів з близькими значеннями ентропії. Всі комбінації мають ідентичний $\Delta S_{p,q,r,t}$, але вищий $S_{\text{повн}}$, наприклад, для комбінацій с b_1 (доменний шлам), що робить їх дещо менш кращими за показниками ентропії.

Особливий інтерес для дослідження представляє аналіз зміни окремих параметрів брикетів при альтернативних складах наступних видів, в порівнянні зі стандартним брикетом (формула $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$). що дозволяє робити висновки про продуктивність брикетів із альтернативними компонентними складами, а отже, є підтвердженням об'єктивності методу суміжних матриць. Вихідні дані для аналізу такі.

$(b_2 + b_3 + b_1 + b_{10})$, усереднений склад: Fe: 55%, SiO_2 : 20%, CaO: 20%, C: 3%, інше 2%.

$(b_5 + b_3 + b_1 + b_{11})$, усереднений склад: Fe: 60%, SiO_2 : 15%, CaO: 15%, Zn: 5%, інше: 5%.

$(b_2 + b_5 + b_1 + b_{12})$, усереднений склад:: Fe: 66%, SiO_2 : 15%, C: 10%, інше: 9%.

$(b_2 + b_3 + b_1 + b_{12})$, усереднений склад:: Fe: 62%, SiO_2 : 18%, CaO: 12%, C: 5%, інше: 3%.

$(b_2 + b_5 + b_1 + b_9)$, усереднений склад: : Fe: 63%, SiO_2 : 10%, C: 20%, інше: 7%.

1. Аналіз параметрів таких брикетів можна звести до порівняння їх механічної міцності, в залежності від хімічного складу, а саме наявності в'язучих речовин (наприклад, цементу, вапна, сульфіто-спиртової барди) і їх взаємодії з компонентами

b_p, b_q, b_r, b_t . Різні відходи (наприклад, доменний пил, окалина, шлак) мають різну гранулометрію і хімічну активність, що впливає на міцність зв'язків в брикеті. При аналізі враховується ступінь пресування при брикетуванні, згідно з нормативними документами, оптимізація вологості матеріалу (23-37%), а також ентропійний внесок системи ($S_{\text{повн}}$), що відображає ступінь неупорядкованості в структурі брикету.

Використовуючи такі витяги, порівнюємо альтернативні варіанти брикетних складів зі стандартним брикетом (формула $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$), розглядаючи в якості критерія стабільності структури брикету співвідношення до його термодинамічних параметрів:

-склад ($b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$), це заміна в стандартному брикеті b_5 і b_{12} на b_1 і b_{10} , призводить до зниження міцності брикету, якщо b_{10} (наприклад, шлак) менш ефективно реагує зі сполучною речовиною, ніж b_{12} (наприклад, шлак високої щільності);

-склад ($b_5 + b_3 + b_1 + b_{11}$) включає заміну в стандартному брикеті b_2 і b_{12} на b_1 і b_{11} , що дозволяє підвищити міцність, якщо b_{11} (наприклад, металева стружка) сприяє кращій адгезії;

-склад ($b_2 + b_5 + b_1 + b_{12}$) це заміна b_3 на b_1 , що може тільки не істотно змінити міцність, якщо b_1 і b_3 мають схожі гранулометричні характеристики;

-склад ($b_2 + b_3 + b_1 + b_{12}$) - аналогічно попередньому, але відсутність b_5 може знизити міцність через більш низьку хімічну активність суміші;

-склад ($b_2 + b_5 + b_1 + b_9$) відповідає стандартному зі зміною b_3 і b_{12} на b_1 і b_9 , що може вплинути на міцність, залежно від природи b_9 (наприклад, якщо це вуглецевмісний матеріал, міцність може збільшуватися через реакції відновлення).

2. Температурний опір (термічна стійкість) характеризує здатність альтернативних брикетів зберігати свою цілісність при більш високих температурах (800-1000 °C). В цілому очевидно, що в порівнянні зі стандартним брикетом, склад альтернативного брикету з b_{10} , b_{11} b_9 може мати вищу термічну стабільність в залежності від їх хімічної природи. Зокрема, b_{11} (металева стружка) сприяє підвищенню термічної стабільності за рахунок металевої матриці, тоді як b_9 (вуглецевмісний матеріал) може зменшити її за рахунок спалювання вуглецю. Однак такі висновки впливають і зі звичайних технологічних знань.

3. Хімічний склад брикетів багато в чому визначається компонентами b_p, b_q, b_r, b_t та додатковими сполучними речовинами. При заміні компонентів змінюється вміст оксидів, металів, вуглецю і летких речовин, реакційна здатність суміші в металургійних

процесах (наприклад, відновлення оксидів заліза в окалино вуглецевих брикетах). Внесок ентропії показує, що збільшення $S_{\text{повн}}$ пов'язане зі збільшенням числа компонентів або їх неоднорідністю, але $\Delta S_{p,q,r,t}$ відображає склад при заміні компонентів, який впливає на рівновагу хімічних реакцій.

4. Враховуючи, що ентропія $S_{\text{повн}}$ у термодинаміці характеризує ступінь неупорядкованості системи, а для брикетів вона залежить від кількості компонентів, їх фазового стану і ступеня перемішування, цей параметр стає залежним від багатокомпонентного характеру вже й кінцевого продукту та інших показників. Багатокомпонентні суміші, наприклад $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$ мають більш високу ентропію, ніж брикети з меншою кількістю компонентів. Зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ виникає при заміні компонентів. Наприклад, заміна b_{12} на b_{10} може підвищити ентропію, від того, що b_{10} має більш складну структуру (наприклад, шлак з домішками).

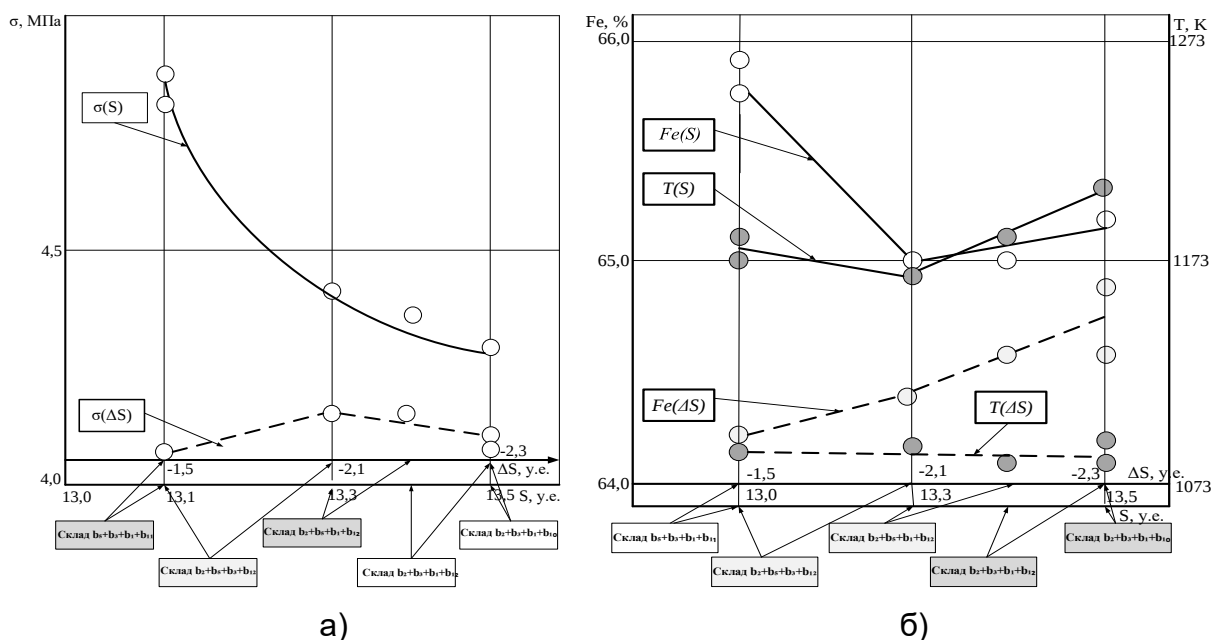


Рисунок 4 – Параметричні залежності взаємодіючих компонентів металургійних відходів від термодинамічних показників кінцевого продукту переробки. Тут а) – механічні властивості кінцевого продукту переробки, як функція його ентропії або зміни ентропії в процесі переробки; б) – хімічні і термічні властивості кінцевого продукту в залежності від його ентропії або зміни ентропії в процесі переробки.

Механічна міцність (σ , МПа) тісно пов'язана зі $S_{\text{повн}}$ таким чином, що з підвищенням $S_{\text{повн}}$, як правило, знижується міцність завдяки зростанню неоднорідності структури брикету (див. рис. 4, а). У той же час зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ для такої системи може сприяти як збільшенню, так і зменшенню міцності в залежності від хімічної та фізичної сумісності нових компонентів.

Хімічний склад будемо оцінювати як частка діючих речовин (наприклад, %Fe), яка може змінюватися в залежності від $\Delta S_{p,q,r,t}$ (див. рис. 4, б). Повна ентропія брикету $S_{\text{повн}}$ корелює з різноманіттям компонентів в його структурі, що може ускладнити контроль структурного складу (див. рис. 4, б). Темп росту $\Delta S_{p,q,r,t}$ впливає на частку активних компонентів (Fe, C), що визначає реакційну здатність брикету в металургійних процесах.

Температурний опір також залежить від величини ентропії. Зазвичай він збільшується в міру зростання $S_{\text{повн}}$ за рахунок утворення рефрактерних фаз (див. рис. 4, б). Висока $S_{\text{повн}}$ тісно пов'язана з утворенням малих вогнетривких фаз, що підвищують термічну стабільність всього брикету. Позитивна зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ може посилити цей ефект, якщо нові компоненти (наприклад, b_{11}) містять оксиди з високою температурою плавлення (більш тугоплавкі).

Відношення до ентропії завжди корелює з другим законом термодинаміки, а збільшення $S_{\text{повн}}$ вказує на перехід системи в менш ймовірний стан, що може знизити механічну міцність, але підвищити термічну стійкість за рахунок стабілізації структури.

Висновки

1. Методика використання багатомірних матриць суміжності дозволяє суттєво розширити номенклатуру кінцевих продуктів в технологіях рециклінгу металургійних відходів за рахунок більш ретельного використання властивостей різних компонентів на користь нової товарної продукції.

2. Чотирьохкомпонентна матриця суміжності, в порівнянні з дво- і трикомпонентними матричними системами, підтверджує можливість створення стандартного брикету ($b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$). Брикети мають високу механічну міцність (≥ 20 МПа), термостійкість (700–1000 °C) і хімічний склад (Fe 50–60%, C 5–10%). Альтернативні комбінації формул ($b_2 + b_5 + b_1 + b_9$), ($b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$) та інші забезпечують аналогічні властивості, подекуди трохи кращі, ніж у брикетів, прийнятих за «стандартний», що робить їх цілком придатними в якості альтернативи для застосування доменної плавки.

Література

1. Matinde, E., Simate, G. S. Mining and Metallurgical Wastes: A Review of Recycling and Re-use Practices. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 118(8), 2018. PP. 825-844.

2. Deus A., Bertani M.-A., Matinde E., Simate, G. S. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. Chapter in Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste, 2019. PP. 51-66.
3. Brandaleze, E., Benavidez, E. R. Treatments and Recycling of Metallurgical Slags. Chapter in Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste, 2019. 19-34.
4. Zhang, Y. (Ed.) Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste. IntechOpen, 2019. 112 p.
5. Motz, H., Geiseler, J. Products of Steel Slags: An Opportunity to Save Natural Resources. Waste Management, 21(3), 2001. PP. 285–293.
6. Potysz, A. Metallurgical Recycling Processes: Sustainability Ratios and Environmental Performance Assessment. Waste Management, Elsevier, 2018. PP.345-356.
7. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. "The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of 'Green Concrete'." Cement and Concrete Research, Elsevier, 2007/ PP. 1590–1597.

Галайко Б. Ю., магістр міжнародних відносин
м. Харків, Україна

ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПОДІЯНОЇ ШКОДИ ҐРУНТАМ ХАРКІВЩИНИ В РЕЗУЛЬТАТІ АГРЕСІЇ РОСІЇ

Україна – велика аграрна країна. Значну частину економіки складає виробництво та експорт сільськогосподарської продукції. Угіддя займають 70,5% загальної площі країни, з них 57% – орні землі [1].

Розрахунок вартості деградації ґрунтів базується на визначенні втраченої продуктивності або необхідних витрат для відновлення. Використовуються два підходи: відновлювальний та рентний. У першому випадку визначаються витрати на рекультивацію, біологічне відновлення, хімічну нейтралізацію залишкових речовин, формування родючого шару та агротехнічні заходи для введення ділянки в обіг. У другому – оцінюється розмір недоотриманого доходу з одиниці площі протягом строку, необхідного для відновлення родючості.

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України затвердило наказом від 04.04.2022 №167 методику оцінки забруднення сільськогосподарських земель, яка розраховується за формулою:

$$РШ = А * ГОЗ * ПД * КН * К_о + В_р,$$

де РШ – розмір шкоди від забруднення ґрунтів, грн; А=1,5 - питомі втрати на ліквідацію наслідків забруднення ділянки; ГОЗ – нормативна грошова оцінка земельної ділянки, грн/м²; ПД – площа забрудненої ділянки, м²; КН – коефіцієнт небезпечної забруднюючої речовини; К_о – коефіцієнт природо- охоронної цінності ділянки; В_р – вартість рекультивації земель[8].

Слід зазначити, що для визначення оцінки забруднення ґрунтів необхідним є врахування коштів (затрат) на проведення інженерно-екологічних досліджень, які включають польові натурні дослідження, визначення масштабів забруднення (площі ореолів і інтенсивності) та виду забруднюючих речовин, а також проведення хіміко-аналітичних досліджень. Ці роботи повинні передувати виконанню оцінки забруднення сільськогосподарських земель.

За оцінками Київської школи економіки та Zoї Environment Network (Женева), в Україні пошкоджено та забруднено 186 тис. кв. км земель, що становить 31% території.

Загальні збитки від пошкодження територій та порушення ґрунтів внаслідок військових дій оцінюються в 9,8 млрд дол. США. Найбільшої шкоди зазнали Донецька, Харківська, Запорізька області[10].

За обласною статистикою, станом на 2021 рік у Харківській області посівні площі сільськогосподарських культур становили 1 736,6 тис. У 2022 році площа оброблених угідь зменшилася на 43% до 987,9 тис. Скорочення посівних площ є наслідком збройної агресії РФ проти України[6].

З 24 лютого 2022 року по 1 жовтня 2024 року Державною екологічною інспекцією у Харківській області підраховано збитки, завдані довкіллю м. Харкова та області внаслідок військової агресії РФ. Загальна сума складає 479 925 891,9 тис. грн. З них за засмічення земельних ресурсів – 466 210 750,5 тис. грн, площа засмічених територій 6 991 980 кв. м; за забруднення ґрунтів – 9 808 531,1 тис. грн, площа забруднених ґрунтів 78 208 кв. м[7].

За звітом «Товариства дослідників України» травень-жовтень 2023 р. загальна оцінка втрат, недоотриманого прибутку та витрат на відновлення сільського господарства через втрати ґрунтів внаслідок військових дій у Харківській області становить 36,7 млрд. грн. (за виключенням 40-км зони до державного кордону; 40-км зони до лінії розмежування; тимчасово окупованої території)[6]. Найбільші втрати мають Оскільська, Барвінківська, Балакліївська, Чкалівська, Ізюмська територіальні громади. На лінії розмежування максимально негативного впливу зазнали ґрунти у районах Куп'янська, Вовчанська. Найбільшого впливу завдала авіація та артилерія ворога, на неї припадає до 80 % впливу. Ґрунти області зазнали ущільнення важкою військовою технікою, є порушення ґрунтового покриву внаслідок розриву мін, гранат, спорудження окопів, землянок, траншей[2]. В результаті збільшується неоднорідність ґрунту, зменшується об'єм пор, ускладнюється доступ води та кисню, руйнується структура, знижується родючість до 50%.

Через бомбардування й артобстріли в гумусному шарі утворилися глибокі кратери. Авіаційна бомба вагою 240 кг створює кратер діаметром 8 м і глибиною до 4 м. У кратері й поблизу нього ґрунт стає непридатним для сільськогосподарських робіт. Природна регенерація ґрунту відбувається дуже повільно: за 100 років гумусний шар відновлюється на 0,5-2,0 см [9].

На основі супутникових знімків Planet Scope від Planet Labs вересня-жовтня 2023 р. в рамках проекту «Картування постраждалих від конфлікту ґрунтів у Харківській області» вивчено стан землекористування. Зафіксовано 420 829 кратерів від вибухів,

42,1 кв. км бомбтурбованих ґрунтів, 1 327 372 куб.м перенесених вибухом ґрунтів [6]. Діаметр кратерів варіює в межах 1,0-13,1 м, вони сформовані артилерією (85 мм, 100 мм, 120 мм, і 152 мм), мінометами (82мм, 160 мм) і РСЗВ («Град», 140 мм) [4].

На Харківщині домінують чорноземи – ґрунти національного значення. Багато ділянок сільгосп призначення з такими ґрунтами не оброблялися через мінування, бомбардування або наявність боєприпасів, що не вибухнули. Чорноземи мають потенціал до ерозії і є вразливими до «бомбтрубації». Цей термін ввели американські вчені Гупі та Шацль для визначення процесу утворення кратерів та перемішування ґрунтів після вибуху боєприпасів [3].

Військові дії призвели до масштабних руйнувань складів з агрохімікатами, мінеральними добривами, цистерн з мастильними матеріалами, моторними оливами, моторним паливом [2]. Наприклад, у 2024 році пошкоджено резервуари з паливно-мастильними матеріалами нафтобази ТОВ «ХНБ-Резерв», стався витік 3,8 тис. куб. м палива, що призвело до забруднення ґрунтів та поверхневих вод. Збитки становлять 157,0 млн грн. [5].

Металеві уламки снарядів, що потрапляють у довкілля, є небезпечними. Чавун із домішками сталі з оболонки боєприпасів містить залізо, вуглець, сірку та мідь. Ці речовини потрапляють до ґрунту і можуть мігрувати до ґрунтових вод та потрапляти до харчових ланцюгів істот. Більш різноманітний вплив мають згорілі танки, транспортні засоби, збиті літаки [7]. Навіть кулі від стрілецької зброї забруднюють ґрунти свинцем. Крім того, після вибухів снарядів в ґрунт потрапляють метали Cr, Cd, Cu, Hg, Ni, Co, Zn, Sb, As. Німецький дослідник Тобіас Баузіnger відносить до індикаторів бойових дій кадмій, мідь, цинк і свинець, бо вони формують високі концентрації [3].

Кадмій – найбільш токсичний і мобільний з металів у ґрунті, тому він швидко адсорбується та акумулюється у рослинах. Забруднення ґрунтів кадмієм спостерігається у місці «свіжого» прильоту снарядів та вибуху військової техніки. Свинець токсичний у будь-якій концентрації. Підвищені концентрації його фіксуються на місці прильоту ракети Х-55 та падіння гелікоптера. Цинк — помірно токсичний. Забруднення ґрунтів цинком є у кратерах від авіабомб і у місцях вибуху техніки. Небезпечною властивістю важких металів є те, що вони не піддаються біологічному розкладанню, тому можуть залишатися в ґрунтах роками в окремих осередках. Наприклад, підвищені рівні міді, свинцю та цинку фіксують досі у Франції та Бельгії після Першої світової війни.

Територія Харківської області має велику інтенсивність замінування за межами міста. До того, близько 10% боєприпасів не розривається, тому може фіксуватися велика кількість нерозірваних боєприпасів. Більшість слід очікувати в Оскільській (до 18 700), Барвінківській (до 6 000) і Балаклійській (до 5200) територіальних громадах [3]. Розмінування лісових масивів, водних об'єктів та інших рекреаційно привабливих зон Харківщини триватиме десятиліттями. При середній вартості \$4/м² загальна потреба в розмінуванні оцінюється в 6,48млрд.дол.США [6].

З метою проведення ефективної політики у сфері охорони земель необхідно сформувати програму заходів з очищення та відновлення земельних ділянок, постраждалих від збройної агресії Росії та запровадити проєкти очищення територій, заходи з консервації, рекультивації та поліпшення земель [2]. Економічна оцінка збитків сприятиме ефективному обґрунтуванню компенсаційних позовів до країни-агресора.

Література

1. Ангурець О. Наслідки для довкілля війни росії проти України 2022. «Чисте повітря для України». 84 с. URL: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf>.
2. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Харківській області у 2023 році. Харків : Департамент зах. довкілля та природокористування, 2024. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1285/128411/Attaches/regionalna_dopovid_2023_harkiv.pdf.
3. Комплексна фізико-географічна оцінка збитків сільського господарства через втрати ґрунтів внаслідок воєнних дій: Харківська область/ О. Бончковський, П. Остапенко, А. Бончковський, В. Швайко, В. Чехній, А. Стракович, А. Лазарець, Н. Бончковська/ Проєкт «Відновлення засобів до існування та відродження сільських громад, що постраждали від мін та вибухонебезпечних повоєнних залишків», що фінансується Продовольчою та сільськогосподарською організацією ООН (ФАО)/ Товариство дослідників України – Київ.: – 2023. – 58 с. URL: <https://www.calameo.com/read/0076485048fabacb275c1>.
4. Комплексна оцінка забруднення сільськогосподарських угідь: Малинівська територіальна громада/ О. Бончковський, П. Остапенко, А. Бончковський, В. Швайко, В. Чехній, А. Стракович, А. Лазарець, Н. Бончковська/ Проєкт «Відновлення засобів до

- існування та відродження сільських громад, що постраждали від мін та вибухонебезпечних повоєнних залишків», що фінансується Продовольчою та сільськогосподарською організацією ООН (ФАО)/ Товариство дослідників України – Київ.: – 2023. – 15 с. URL: <https://www.calameo.com/read/0076485045fae206c93a1>.
5. Наконечна Є. У Харкові внаслідок нічної атаки горить нафтобаза. dw.com. URL: <https://www.dw.com/uk/u-harkovi-vnaslidok-nicnoi-ataki-gorit-naftobaza-policia/a-68221456>.
6. Оцінка збитків сільського господарства через втрати ґрунтів внаслідок військових дій: Харківська область/ [За заг. ред. П. Остапенка]/ Проект «Картування постраждалих від конфлікту ґрунтів у Харківській області», що фінансується Продовольчою та сільськогосподарською організацією ООН (ФАО)/ Товариство дослідників України – Київ.: – 2023.–63 с. URL: <https://www.calameo.com/read/007648504ae0180e637df>.
7. Програма комплексного відновлення території Харківської міської територіальної громади : Дод. до рішення від 05.02.2025 № 735/25. URL: <https://e-construction.gov.ua/files/restoration/2025-02-11/8a9b94c6-9e9d-46db-909e-6e0dbac5b7e8.pdf>.
8. Про затвердження Методики визначення розміру шкоди завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій та/або збройної агресії та бойових дій під час дії воєнного стану : Наказ від 04.04.2022 № 167. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0406-22#Text>.
9. Станкевич С. В. Техноекологія : навч. посіб. Харків : Іванченка І.С., 2020. 338 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Stankevich_2020_338.pdf.
10. Яких екологічних наслідків зазнала Україна за час війни окрім збитків від підриву Каховської ГЕС. Kyiv School of Economics. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/yakih-ekologichnih-naslidkiv-zaznala-ukrayina-za-chas-viyni-okrim-zbitkiv-vid-pidrivu-kahovskoyi-ges/>.

Ihor O. Honcharenko, PhD;

International humanitarian organization ACTED, Kyiv, Ukraine

Maryna Oskina, PhD Candidate

*The Scientific Research Institution "Ukrainian Research Institute of Environmental Problems",
Kharkiv, Ukraine*

SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF APPROACHES TO ENHANCE THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF THERMAL POWER PLANTS WHEN USING AGRICULTURAL WASTE AS A FUEL

Introduction

Thermal power plants (TPPs) remain one of the major contributors to anthropogenic air pollution due to their predominant reliance on fossil fuels such as coal, oil, and natural gas. Their emissions are associated with greenhouse gas accumulation, acidifying compounds, particulate matter, and other hazardous pollutants that undermine both environmental quality and human health (IPCC, 2018). In the context of energy transition, the gradual substitution of fossil fuels with renewable energy sources (RES) is considered a key strategy for decarbonisation and for achieving higher levels of ecological safety in the energy sector (IEA, 2021). Among the available renewable alternatives, agricultural residues - particularly sunflower husks, press cake, and meal generated during sunflower processing - represent a resource of high potential. Ukraine, as one of the world's leading sunflower producers, accumulates significant annual volumes of such residues, creating favourable conditions for their energy utilisation in boilers and thermal power plants. The advantages of sunflower residues include relatively high calorific value and low sulphur content, which make them attractive as biofuel substitutes (Demirbas, 2005; Werther et al., 2000).

At the same time, the combustion of sunflower residues poses several ecological and technological challenges. Their relatively high ash content (3–5% in husks), variable moisture levels, and unstable granulometric composition may result in slagging, fouling, and reduced boiler efficiency. More critically, experimental studies indicate that flue gases from sunflower residue combustion can contain hazardous pollutants such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), volatile organic compounds (VOCs), and odour-forming substances, including acrolein and benzene. These pollutants are known for their toxicity, carcinogenic potential, and long-term ecological impact (Nussbaumer, 2003; Valverde & Medina, 2018).

Yet, the current Ukrainian regulatory framework does not explicitly include these compounds in the list of controlled emissions for biomass combustion facilities, creating a gap in air quality monitoring and risk assessment. Given these challenges, there is a growing need for scientifically justified methods to enhance the ecological safety of TPPs operating on sunflower residues. This requires not only technological improvements in fuel preparation, combustion, and gas cleaning systems, but also the development of modernised monitoring and regulatory approaches aligned with international best practices (European Commission, 2017; EEA, 2019).

The objective of this study is to propose and substantiate methods aimed at reducing the environmental risks associated with sunflower residue combustion at TPPs. To achieve this, the research applies a hierarchical decomposition approach to assess risks, prioritise ecological safety measures, and identify practical solutions for implementation at different territorial levels. The approach integrates expert-analytical methods and multi-criteria decision-making techniques, providing a comprehensive framework for evidence-based environmental management.

Environmental risks of sunflower residue combustion

The use of sunflower processing residues as fuel at thermal power plants provides a viable alternative to fossil energy sources, yet it also introduces a complex set of environmental risks. These risks arise from the specific physical and chemical properties of the residues, as well as from the incomplete adaptation of existing combustion and flue-gas treatment technologies to such fuels.

One of the key challenges is the high ash content of sunflower husks (3–5%), which promotes slagging and fouling in boilers. These processes reduce operational efficiency and increase the need for maintenance, while also intensifying the release of fine particulate matter. Another important factor is the variability of fuel quality, including moisture content and particle size distribution, which leads to fluctuations in combustion stability and emissions.

More critical, however, are the toxic organic compounds generated during combustion. Experimental studies and practical trials have demonstrated that flue gases from sunflower husks and press cake may contain:

- **Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)** – persistent organic pollutants with mutagenic and carcinogenic properties, known to accumulate in ecosystems and pose long-term risks to human health (Seinfeld & Pandis, 2016).

- **Volatile organic compounds (VOCs)** such as **acrolein** ($\text{CH}_2=\text{CHCHO}$), a highly toxic aldehyde capable of causing acute respiratory irritation and odour nuisances near emission sources (Jenkins et al., 1998; Demirbas, 2005).

- **Benzene**, recognised as a Group 1 carcinogen (IARC, 2018), which is especially concerning given its potential emission even at low combustion temperatures.

These substances are not currently included in the Ukrainian emission inventory methodology for biomass combustion. As a result, official air quality data may underestimate the actual ecological risks of sunflower residue-based energy production. This regulatory gap complicates the design of effective mitigation technologies and hinders the alignment of Ukraine's air quality management system with European standards (European Commission, 2017; EEA, 2019).

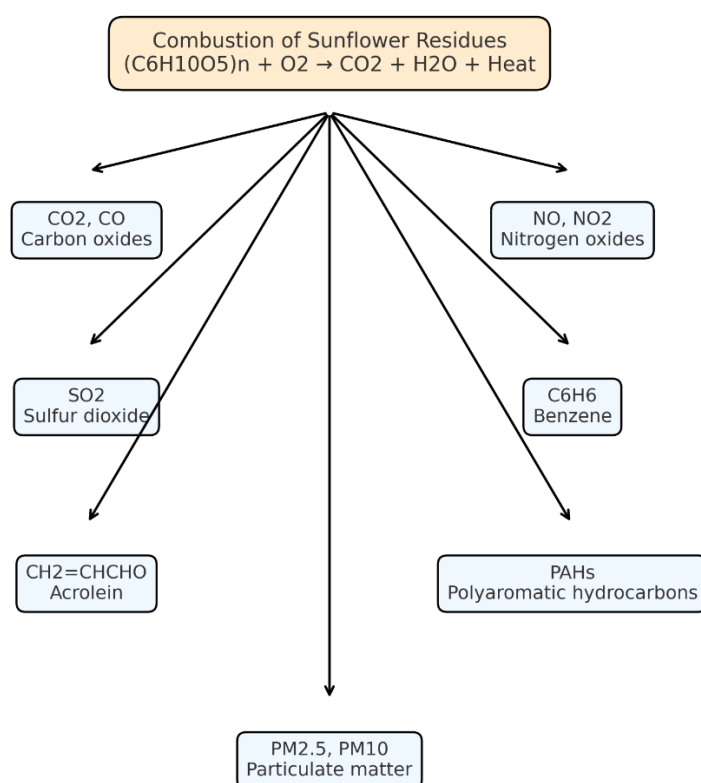


Figure 1 – Pollutant flows from sunflower residue combustion

To illustrate these issues, Figure 1 can present a schematic diagram of pollutant flows during sunflower residue combustion, highlighting both conventional pollutants (SO_2 , NO_x , particulate matter) and unregulated compounds (PAHs, acrolein, benzene). Such a figure will help visualise the complexity of emissions and emphasise the need for updated monitoring and control strategies.

In summary, while sunflower residues hold significant promise for bioenergy applications, their combustion introduces environmental hazards that must be systematically addressed. A targeted combination of advanced combustion technologies, efficient gas-cleaning systems, and improved monitoring approaches is necessary to minimise the release of hazardous pollutants and to ensure the ecological safety of power generation facilities.

Methodological approach - hierarchical decomposition

The methodological framework is based on the AHP, which enables decomposition of the ecological safety management task into hierarchical levels. The objective is to justify and prioritize measures that reduce atmospheric pollution from thermal power plants (TPPs) using sunflower processing residues as fuel. Logic of the model could be present as followed:

1. Objective (Obj): Ensure ecological safety of atmospheric air in the zone of influence of TPP emissions.

2. Criteria (C): Environmental components exposed to pollutants (air, soil, water, human health, flora, fauna).

3. Characterization of factors (ChF): Complex pollution factors (volume, toxicity, persistence, accumulation).

4. Object groups (Go): Groups of measures (technological, organizational, monitoring).

5. Territorial level of implementation (TLI): Object-level (plant), local (hromada), regional.

6. Security measures (SM): Concrete interventions – fuel preparation optimization, emission control (filters, scrubbers, catalytic afterburners), continuous monitoring (CEMS), risk modelling.

Table 1 – Example of links between hierarchy levels

Hierarchy level	Element	Example of expert question
Obj	Ecological safety of air	Which intervention most reduces the overall risk of air pollution?
C	Human health	Which pollutant (SO ₂ , NO _x , PAHs, VOCs) has the greatest impact on health?
ChF	Toxicity	How significant is the carcinogenic risk of benzene vs acrolein compared to CO or NO _x ?
Go	Gas cleaning	Which technology (ESP, scrubber, catalyst) is most effective for VOC reduction?

TLI	Local hromada	Should monitoring and response measures be decentralized to communities?
SM	Continuous monitoring	How important is real-time CEMS compared to periodic laboratory testing?



Figure 2 – Scheme of hierarchical decomposition (AHP-based model)

Results and conclusions

The hierarchical decomposition (Figure 2) structured the problem of ecological safety into logically connected levels – from the overarching objective of reducing air pollution to specific technical and organizational measures. This approach ensured that both quantitative emission factors and qualitative risk characteristics were incorporated into decision-making.

The analysis showed that the combustion of phytomass-based fuels (sunflower residues) results not only in conventional pollutants such as CO₂, SO₂, and NO_x, but also in toxic volatile organic compounds (VOCs) such as acrolein (CH₂=CH-CHO) and benzene (C₆H₆), along with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). These pollutants are not currently regulated in Ukrainian environmental standards, which creates a significant gap in air quality management.

Using AHP were identified the highest-priority criteria of groups of measures (Go) and security measures (SM). The highest-priority groups of measures included:

- Advanced gas cleaning systems (e.g., scrubbers, catalytic converters).
- Continuous monitoring technologies (CEMS).
- Organizational measures such as updating emission standards to include VOCs and PAHs.

At the most practical level, security measures (SM) were defined as:

- Optimization of fuel preparation and pre-treatment to reduce instability of residues.
- Application of best available technologies (BAT) for VOC and PAH control.
- Integration of real-time monitoring and early-warning tools into local risk management systems.

This hierarchical approach is particularly relevant for conflict-affected regions of Ukraine, where experimental datasets are limited, and decision-making relies on expert knowledge and structured evaluation methodologies.

References

1. Babcock & Wilcox (2015) *Steam: Its Generation and Use*. 42nd edn. Barberton, OH: Babcock & Wilcox Enterprises.
2. Basu, P. (2013) *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. 2nd edn. Academic Press, London.
3. Demirbas, A. (2005) 'Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues', *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), pp. 171–192.
4. European Commission (2017) *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants (LCP BREF)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

5. European Environment Agency (EEA) (2019) *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*. EEA Report No. 13/2019. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
6. International Agency for Research on Cancer (IARC) (2018) *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 120: Benzene*. Lyon: IARC.
7. International Energy Agency (IEA) (2021) *Renewables 2021: Analysis and Forecast to 2026*. Paris: IEA.
8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018) *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report*. Geneva: IPCC.
9. Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles, T.R. and Miles, T.R. (1998) 'Combustion properties of biomass', *Fuel Processing Technology*, 54(1–3), pp. 17–46.
10. Nussbaumer, T. (2003) 'Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction', *Energy & Fuels*, 17(6), pp. 1510–1521.
11. Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd edn. Hoboken, NJ: Wiley.
12. Valverde, J.L. and Medina, S. (2018) 'Emissions of odorous and hazardous compounds from biomass combustion', *Renewable Energy*, 121, pp. 174–185.
13. Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T. and Siagi, Z. (2000) 'Combustion of agricultural residues', *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), pp. 1–27.

Горишнякова Я. В., наук. співр., аспірантка;

Пилипенко Л. В., наук. співр.;

Мар'єнко О. С., наук. співр.;

Волков Ю. В., наук. співр.;

Нікітіна С. В., наук. співр.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ В ЗОНІ ВПЛИВУ ВИБУХУ ТА ПОЖЕЖІ НА НАФТОБАЗІ В РЕЗУЛЬТАТІ РАКЕТНИХ ОБСТРІЛІВ м. ХАРКОВА

У липні-грудні 2024 року та у січні-квітні 2025 року в рамках робіт по темі меморандуму від 09 липня 2024 р. № NUR/MON 2024405 з UNICEF representative UKRAINE на тему: «Зниження техногенного навантаження на ґрунти і водний горизонт ґрунтових вод внаслідок розтікання нафтопродуктів у долину р. Немишля в результаті бомбардування та пожежі нафтобази, що буде реалізовуватися у м. Харкові по вулиці Котельній», Науково-дослідною установою «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем (УКРНДІЕП)» проводилися дослідження екологічного стану довкілля.

У складі комплексного моніторингу крім поверхневих та підземних вод і донних відкладень в р. Немишля, об'єктом екологічних вишукувань були ґрунти на присадибних земельних ділянках приватного сектору Немишлянського району Харкова.

Основною метою робіт було науково-обґрунтоване дослідження наслідків вибуху нафтобази ТОВ «ХБН-Резерв» в м. Харків для ґрунтів, з визначенням оцінки їх екологічного стану та динаміки зміни в часі інтенсивності забруднення нафтопродуктами та важкими металами. Для досягнення цієї мети була розроблена програма робіт та регламент проведення моніторингу [1].

Реалізація цільового призначення робіт здійснювалася шляхом проведення польових та лабораторних досліджень в складі інженерно-екологічних вишукувань, які виконувались у відповідності до регламенту моніторингу для вирішення завдань, поставлених в програмі робіт. Проведення моніторингу впливу вибуху нафтобази

ТОВ «ХБН-Резерв» в м. Харків на екологічний стан ґрунтів полягало в виконанні досліджень, які включали:

- проведення рекогносцирувальних спостережень та польових натурних досліджень;
- відбір проб ґрунтів ґрунтового покриву в межах осередку забруднення на територіях житлових забудов, які постраждалих від вибуху та пожежі;
- дослідження відібраних проб - проведення еколого-аналітичних (зокрема, хіміко-аналітичних) досліджень ґрунтів на вміст нафтопродуктів, важких металів та макрокомпонентів;
- систематизацію вихідних матеріалів, обробку результатів моніторингових досліджень та їх візуалізацію;
- аналіз і оцінку екологічного стану і інтенсивності забруднення ґрунтів.

Проби ґрунтів відбиралися на присадибних земельних ділянках з різної глибин зони аерації як в межах вулиць, що знаходилися в епіцентрі вибуху та пожежі (в осередку забруднення), так і на вулицях, віддалених від епіцентру. На першому етапі моніторингу в період літньої межени (липень-серпень) 2024 року, дослідження проводились з метою визначення макрокомпонентного складу водних витягів (для виявлення особливостей їх солевмісту) та інтенсивності забруднення нафтопродуктами і важкими металами на глибинах 0,0-0,05 м (поверхневий шар); 0,15 м; 0,5 м та 1,0 м. В подальшому, в період осінньо-зимової межени та весняного паводку 2024 - 2025 років, моніторингові спостереження проводилися в 3-х пунктах, де встановлено максимальне забруднення ґрунтів нафтопродуктами. Це приватні ділянки на вулицях: Ясенева, 41/1 і Танкова, 129 (з поверхневого шару) та Котельна, 30 (з глибини 0,15 м).

Результати польових вишукувань і хіміко-аналітичних досліджень проб ґрунтів стали підґрунтям для оцінки їх екологічного стану та інтенсивності забруднення.

Забрудненість ґрунтового покриву оцінювалася за даними моніторингових досліджень щодо солевмісту в ґрунтах, вмісту нафтопродуктів, важких металів (*марганцю, бору, барію, нікелю, свинцю, кадмію та цинку*), а також за даними щодо радіаційного забруднення ґрунтів (показники дози *гама-* і *бета-випромінювання*).

Оцінка якості ґрунтів за хімічними показниками їх водного розчину. Водний розчин ґрунтів, відібраних в зазначених створах, характеризувався гідрокарбонатним аніонним і перемінним катіонним складом в залежності від періоду відбору проб ґрунтів. При цьому за хімічним складом формуються гідрокарбонатний магнієвий ($С^{Mg}$),

гідрокарбонатний кальцієвий (C^{Ca}), гідрокарбонатний натрієвий (C^{Na}) та гідрокарбонатний кальцієво-натрієвий (C^{CaNa}) типи водного розчину.

Загальні показники. За величиною активної реакції рН, в ґрунтовому покриві виявлено ґрунти з *нейтральною* і *слаболужною* рН-реакцією при варіюванні показника в межах рН = 6,92 – 7,93. За показником *загальної жорсткості* водні витяги ґрунтів як в меженні періоди, так і в період весняного повіддя характеризувалися як *м'які* (1,8 – 2,8 ммоль/100 г) і *помірно жорсткі* (3,6 – 4,2 ммоль/100 г).

Рівень солевмісту в ґрунтах. Показники мінералізації свідчать, що в період літньої межени мінералізація водного розчину ґрунтів становила 0,18 - 0,29 г/100г; в період осінньої межени – 0,17 – 0,37 г/100г; в період зимової межени - 0,24 – 0,34 мг/100 г, а в весняний період - 0,26– 0,29 г/100 г. Згідно з такими показниками, водний розчин ґрунтів відноситься до прісних з мінімальним солевмістом. У водному розчині ґрунтів за весь період досліджень перевищення ГДК за вмістом солей не спостерігалось в усіх пробах. Відповідно нижче ГДК був вміст хлоридів і сульфатів, який в жодній пробі не перевищує нормативних вимог [2].

Біогенні речовини. Вміст сполук азоту та фосфору в водному розчині ґрунтів за період моніторингових досліджень знаходився в межах ГДК окрім іонів амонію. Вміст *іоніза амонію* (NH_4) в водному розчині ґрунтів зафіксований у кількості від 0,09-0,35 мг/дм³ до 0,81-0,95 мг/дм³ (1,6-1,8 ГДК).

Рівень забруднення ґрунтів нафтопродуктами. Вміст нафтопродуктів в ґрунтах на території житлової забудови в епіцентрі вибуху, або поблизу до нього, в період хронічного забруднення довкілля характеризувався концентраціями, які значно перевищували ГДК [2]. На рисунку 1 приводяться графіки їх зміни в часі та по території в порівнянні з концентраціями в донних відкладеннях р. Немишля на ділянці, яка знаходиться в осередку забруднення.

За період **літньої межени** по вулиці *Ясенєва, 41/1* був встановлений максимальний вміст нафтопродуктів, який складав: на глибині 0,15 м – 20109 мг/кг (40,22 ГДК). При цьому, на глибині 0,5 м – 2746 мг/кг (5,49 ГДК); на глибині 1,0 м – 5533 мг/кг (11,07 ГДК). По *вулиці Танкова, 129* вміст нафтопродуктів в липні становив: на глибині 0,15 м - 3784,0 мг/кг (7,7 ГДК), на глибині 0,5 м - 3463,0 мг/кг (6,9 ГДК); На глибині 1,0 м зафіксовані нафтопродукти в кількості 1746 мг/кг (3,49 ГДК) і на приватному подвір'ї по *провулку 1-й Плідний, 16*. По вулиці *Велозаводська* (фонова ділянка) в поверхневому шарі ґрунту вміст нафтопродуктів становив 1080,0 мг/кг (2,16 ГДК).

У пробах, відібраних в період **осінньої межені**, вміст нафтопродуктів по вулиці Танкова, 129 зменшився до 1809 мг/кг (3,62 ГДК), а на глибині 0,5 м – незначно, але збільшився до 3951 мг/кг (7,90 ГДК). На інших вулицях концентрації нафтопродуктів в пробах ґрунтів були значно нижчими і становили: в поверхневому шарі - 248 мг/кг, на глибині 0,5 м - в межах 65-69мг/кг; на глибині 1,0 м – в межах 30-90 мг/кг, що згідно нормативних вимог [2], не перевищувало ГДК (рис.2).

В період **зимової межені** в *поверхневому шарі* ґрунтового покриття вміст нафтопродуктів становив: по *вулиці Ясенєва 41/1* в грудні - 2100 – 2735 мг/кг (4,20 – 5,47 ГДК); в січні - 7553 мг/кг (15,11 ГДК) і в лютому - 12582 мг/кг (25,16 ГДК); по *вулиці Танкова 129*; в грудні - на рівні 2735 мг/кг (4,14 ГДК), у січні - 4646 мг/кг (9,3 ГДК). На глибині 0,15 м по *вулиці Котельна, 30*, концентрація нафтопродуктів зафіксована в грудні - 1052 мг/кг (2,01 ГДК); в січні - 6497 мг/кг (13,0 ГДК), в лютому –3075 мг/кг (6,15 ГДК).(рис. 1).

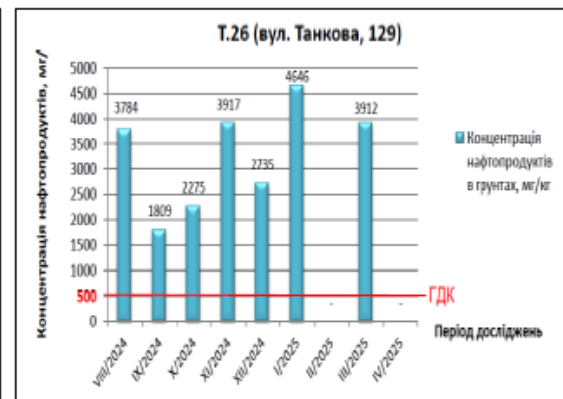
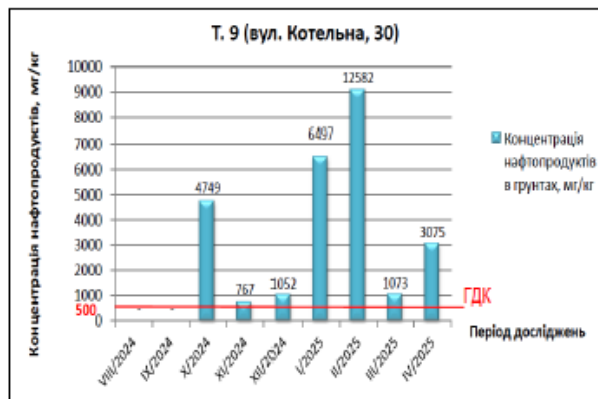
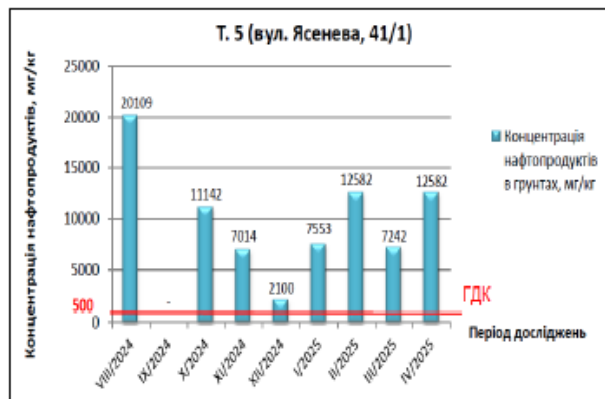
В пробах ґрунту, відібраних в **весняний період** (березень, квітень), вміст нафтопродуктів становив:

- в *поверхневому шарі* по *вулиці Ясенєва, 41/1*– 7242 мг/кг (14,48 ГДК) - в березні та 4830 мг/кг (9,66 ГДК) - в квітні; по *вулиці Танкова, 129* – 3912 мг/кг (7,82 ГДК) - в березні; по *вулиці Котельна, 30* (на глибині 0,15 м)– 1073 мг/кг (2,15 ГДК) - в березні та 895 мг/кг (1,79 ГДК) - в квітні;.

Максимальний вміст нафтопродуктів в ґрунтах в зимовий та весняний періоди був встановлений по *вулиці Ясенєва, 41/1* і складав в *поверхневому шарі* ґрунту в лютому – 12582 мг/кг (25,16 ГДК); та в січні - 7553 мг/кг (15,1 ГДК). На інших вулицях концентрації в цей період були нижчими і перевищували ГДК в 1,79-12,99 разів.

Підсумок. Приведена на рисунку 1 динаміка зміни в часі та по території вмісту нафтопродуктів у ґрунтах свідчить, що їх концентрації практично не залежать від зміни сезонів року. Інтенсивність забруднення ґрунтів дуже висока як в поверхневому шарі, так і на глибині 0,5 м та 1,0 м.

Вміст нафтопродуктів в ґрунтах



Вміст нафтопродуктів в донних відкладах р. Немишля

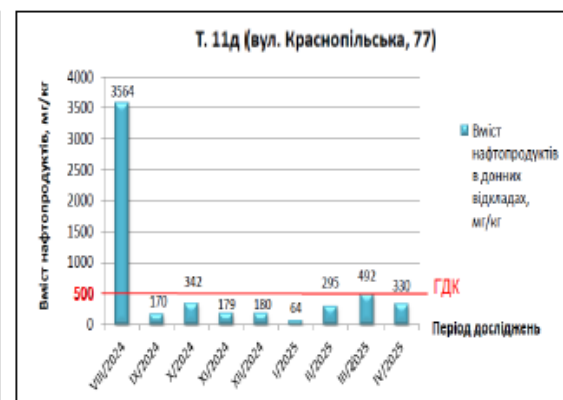
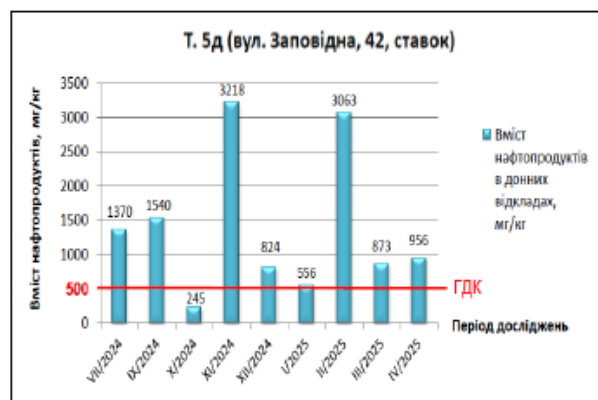
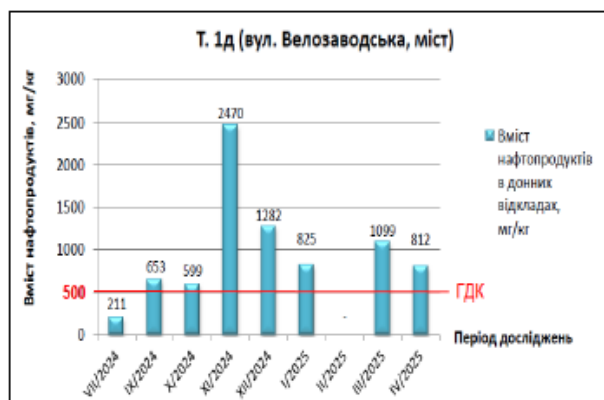


Рисунок 1 – Динаміка зміни концентрації нафтопродуктів в ґрунтах за період досліджень вересень 2024 р. – квітень 2025 р

Рівень забруднення ґрунтів важкими металами Вихідними даними для оцінки забруднення ґрунтового покриву є моніторингова інформація про вміст важких металів у ґрунтах (*марганцю, бору, барію, нікелю, свинцю, кадмію та цинку*) в періоди межені та весняного повіддя в 2024-2025 роках. Як в меженні періоди, так і в період весняного повіддя, валовий вміст важких металів в поверхневому шарі ґрунтового покриву зафіксований в кількості, яка знаходиться або в межах ГДК (*марганець та барій*), або вище ГДК (*нікель, цинк* та в одиничних замірах – *бор і свинець*) [2]. Максимальні концентрації в ґрунтах відзначалися для вмісту валової форми *нікелю* (рис.2) та валової і рухомої форми *цинку* (рис. 3).

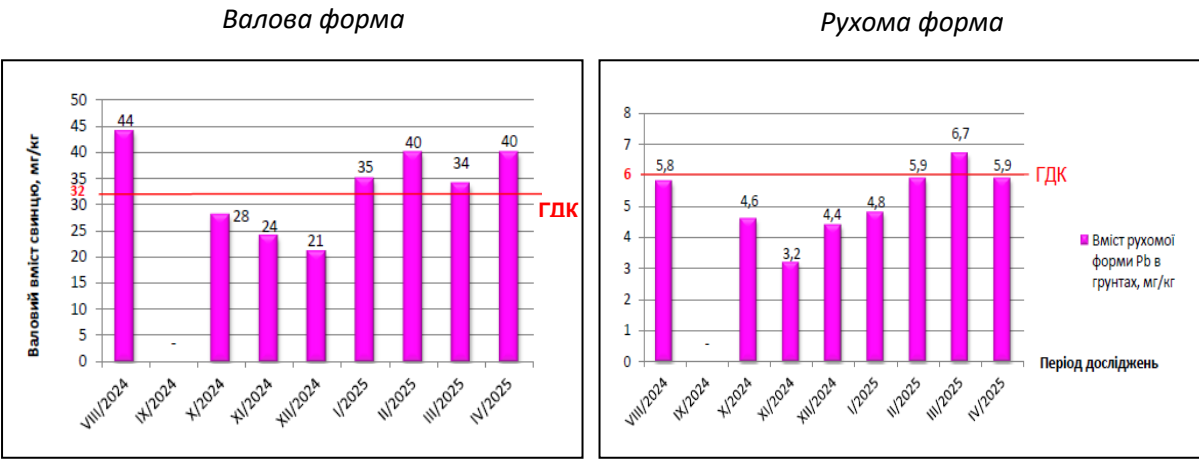
Діапазон концентрацій важких металів в часі. В пробах ґрунтів, відібраних в поверхневому шарі і на глибині 0,15 м на приватних подвір'ях зазначених вище вулиць, протягом всього періоду досліджень встановлено перевищення ГДК валової та рухомої форм *цинку*. Його валовий вміст змінювався в часі і по території переважно в межах від 26,0-72,0 мг/кг (1,13–3,13 ГДК) до 105–170 мг/кг (4,57- 7,39 ГДК). Підвищений вміст рухомої форми *цинку* змінюється в часі від 25,0 – 47,0 мг/кг (1,09 – 2,04 ГДК) до 50-74 мг/кг (2,17 – 3,22 ГДГ). Перевищували ГДК в ґрунтах і концентрації валової форми *нікелю*, які змінювалися від 5,8-20 мг/кг (1,4 – 5,0 ГДК) до 27- 42,2 мг/кг (6,75 – 10,55 ГДК). Вміст рухомої форми *нікелю* в жодній пробі ґрунту не перевищував ГДК і змінювався в межах 0,5 – 1,4 мг/кг (0,13 – 0,35 ГДК). Перевищення ГДК за вмістом валової форми *бору* (32-36 мг/кг) та *свинцю* (34-44 мг/кг) зафіксовані в поодинокних пробах і знаходяться відповідно в межах 1,07 – 1,25 ГДК та 1,06 - 1,25 ГДК (рис.2).

Діапазон концентрацій важких металів по території. В Т. № 5 (на подвір'ї по вулиці Ясенєва, 41/1) незначне перевищення ГДК зафіксоване лише за валовим вмістом *бору* (32 - 36 мг/кг або 1,07 – 1,2 ГДК) і *свинцю* (35 - 40 мг/кг або 1,1 – 1,25 ГДК). Концентрація рухомої форми *свинцю* перевищувала ГДК лише в *березні* в одній пробі і становила 6,7 мг/кг (1,12 ГДК)(рис.2).. При цьому рухома форма *цинку* перевищувала нормативні вимоги впродовж всього періоду досліджень (січень – квітень 2024-2025р.) і змінювалася в межах 25,0 – 33,0 мг/кг (1,09 – 1,43 ГДК) (рис.3).

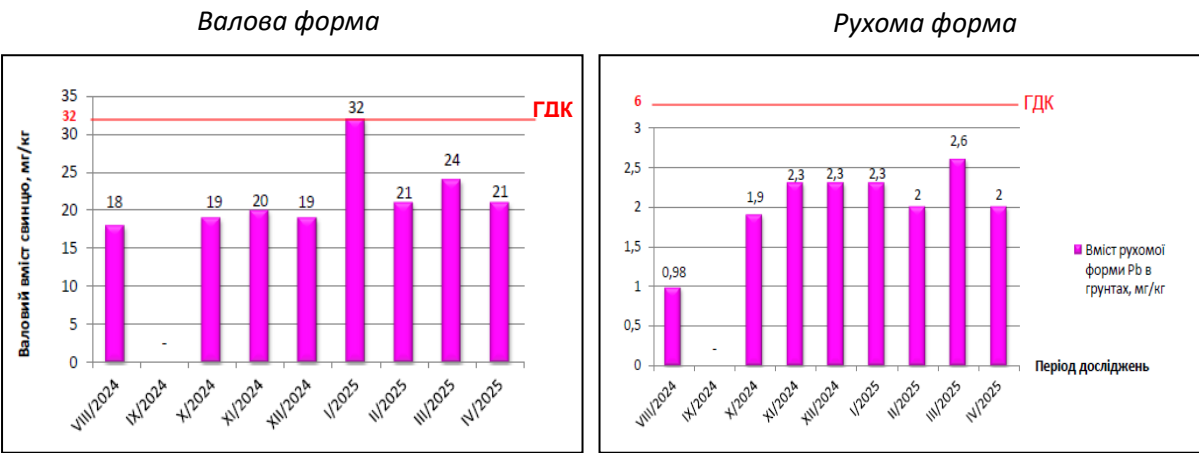
По вулиці Котельна, 30 на глибині 0,15 м валовий вміст металів окрім *нікелю* та *цинку*, в жодній пробі не перевищував ГДК. За рухомою формою перевищення ГДК зафіксоване лише по *цинку* – в межах від 25,0 мг/кг до 47,0 мг/кг (1,09 – 2,04 ГДК) (рис.3). На присадибній ділянці по вулиці Танкова, 129, незначне перевищення спостерігалось за валовим вмістом *бору* (31-36 мг/кг), що становить 1,0 – 1.2 ГДК і *свинцю* (39 мг/кг) лише в одній пробі в період весняного повіддя. За рухомою формою

перевищення зафіксоване для *цинку* – 53,0-74,0 мг/кг (2,30 - 3,10 ГДК) (рис.3) та незначне – для *свинцю* - 6,4 мг/кг (1,07 ГДК) лише в одній пробі в період весняного повіддя (рис. 2).

Т.5, вул. Ясенева, 41/1



Т.9, вул. Котельна, 30



Т.26, вул. Танкова, 129

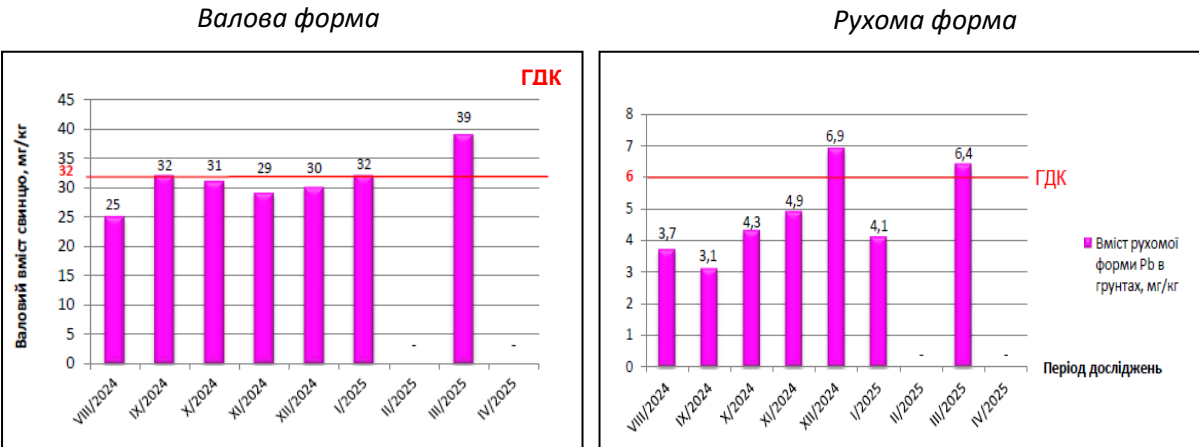
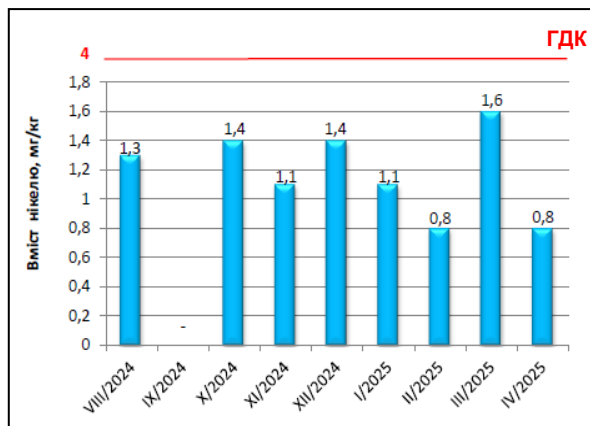


Рисунок 2 – Динаміка зміни концентрацій свинцю в ґрунтах в період досліджень серпень 2024 р. – квітень 2025 р.

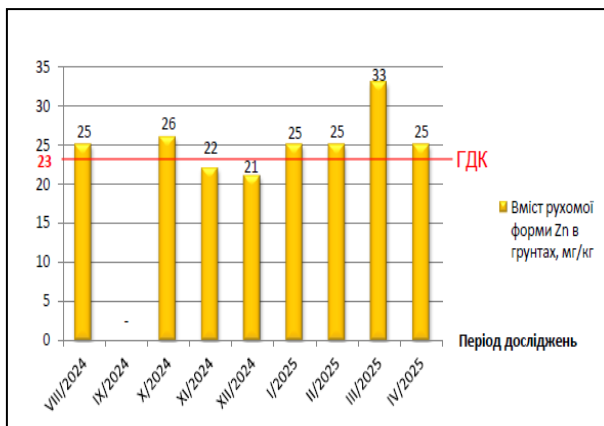
Вміст рухомої форми в) нікелю та г) цинку в ґрунтах

Т.5, вул. Ясенева, 41/1

в) нікель

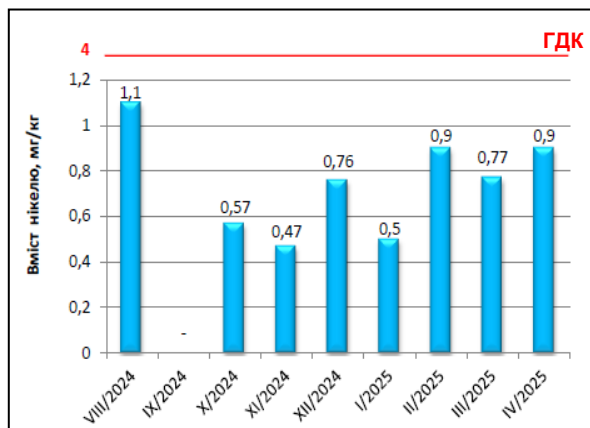


г) цинк

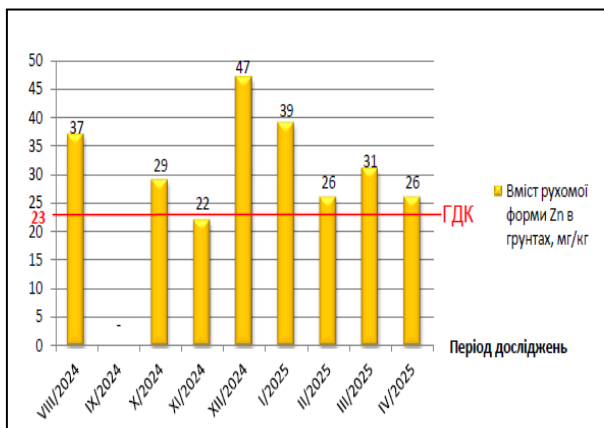


Т.9, вул. Котельна, 30

в) нікель

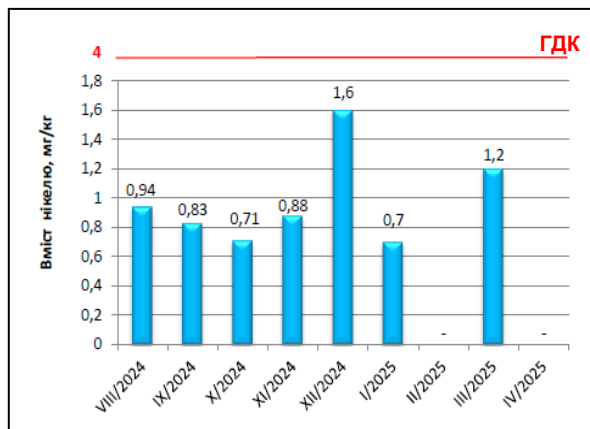


г) цинк



Т.26, вул. Танкова, 129

в) нікель



г) цинк

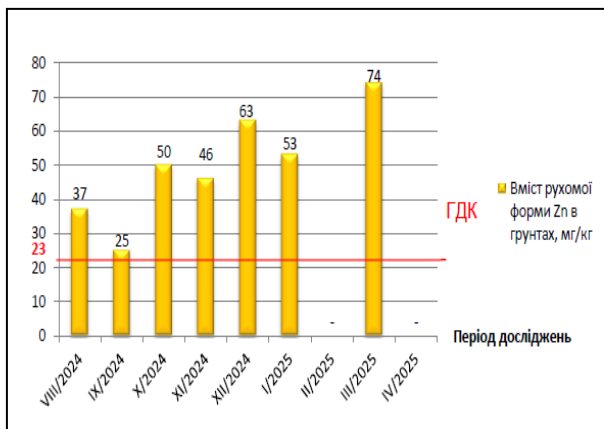


Рисунок 3 – Динаміка зміни концентрацій нікелю та цинку в ґрунтах в період досліджень серпень 2024 р. – квітень 2025 р.

Розраховані коефіцієнти техногенного геохімічного навантаження на ґрунти за вмістом валової і рухомої форми металів, наведені відповідно в таблиці 1 і в таблиці 2.

Таблиця 1 – Межі коливання значень (K_i) для ґрунтів (валова форма)

Сезон року, місяць	$K_i \leq 1-1,0$	$K_i \leq 1-1,4$	$K_i = 1-1,43$		$K_i = 1-8,48$	
	Mn	Pb	B	Ba	Ni	Zn
Літня межень	0,33-0,48	0,56-1,38	0,93-1,20	0,83-1,35	2,75-6,75	1,78-8,48
Осіння межень	0,24-0,40	0,59-1,00	0,11-0,87	0,65-0,80	1,75-8,00	0,91-6,83
Зимова межень	0,22-0,33	0,59-1,25	0,80-1,20	0,57-0,85	2,75-5,00	1,48-6,43
Весняна повінь	0,27-0,40	0,60-1,25	0,28-1,43	0,65-0,85	1,45-4,50	2,26-7,39

Значення (K_i), наведені в таблиці 1, свідчать про відсутність забруднення ґрунтів за вмістом валової форми марганцю та барію; відносно незначний рівень забруднення - за вмістом бору і свинцю і значне забруднення за вмістом валової форми нікелю і цинку. Для нікелю значення K_i досягають 4,50 – 8,0; для цинку – 6,43 – 8,48.

Таблиця 2 – Межі коливання значень (K_i) для ґрунтів (рухома форма)

Сезон року, місяць	$K_i \leq 1-1,5$	$K_i \leq 1-1,15$	$K_i = 1-3,22$	
	Mn	Pb	Ni	Zn
Літня межень	0,21-1,5	0,16-0,62	0,24-0,33	1,09-1,61
Осіння межень	0,34-0,71	0,32-0,82	0,12-0,35	0,96-2,17
Зимова межень	0,49-0,86	0,38-1,15	0,13-0,35	0,91-2,04
Весняна повінь	0,41-0,80	0,33-1,12	0,19-0,40	1,09-3,22

Згідно зі значеннями (K_i), приведеними в таблиці 2, рівень забруднення ґрунтів за вмістом рухомої форми марганцю і свинцю є незначним; За увесь період досліджень значення K_i переважно не перевищують 1,0 і коливаються в межах 0,21-0,86 – для марганцю та 0,16-0,33 – для свинцю. Лише в період літньої межні спостерігалось максимальне значення $K_i = 1,5$ для марганцю та в періоди зимової і весняної межні відповідно $K_i = 1,15$ і $K_i = 1,12$ - для свинцю. За вмістом нікелю $K_i \leq 1,0$, тобто, стан ґрунтів відповідає вимогам санітарно-гігієнічних нормативів (забруднення відсутнє) [2]. За вмістом рухомої форми цинку ґрунти забруднені: значення K_i змінюється переважно в межах 1,09 – 3,22.

Результати радіометричних досліджень відібраних проб ґрунтів свідчать про їх радіаційну безпеку для жителів території, яка постраждала в результаті вибуху та пожежі на нафтобазі.

Підсумки

Ґрунти в поверхневому шарі ґрунтового покриву на території земельних ділянок приватних домоволодінь досить інтенсивно забруднені *нафтопродуктами* й важкими металами, зокрема, *нікелем* та в поодиноких пробах - *свинцем* і *бором* (валова форма), а також *цинком* (валова і рухома форми). Концентрації нафтопродуктів в поверхневому шарі на вулицях Танкова, 129; Котельна, 30; Заповідна, 54; Ясенєва, 41/1, в 2-14 разів перевищують ГДК.

На час досліджень ґрунти на присадибних ділянках приватного сектору являють собою джерело забруднення рослинності, що унеможлиблює безпечне вирощування огородини для споживання. В цих умовах існує ризик захворювань дорослих і дітей.

На основі результатів моніторингових досліджень з метою очищення ґрунтів від забруднення і забезпечення прийнятних умов для проживання і користування земельними ділянками, розроблені рекомендації для місцевих жителів та органів влади щодо реалізації першочергових заходів.

Література

1. Гриценко А.В., Маркіна Н.К. Методологія дослідження екологічних та соціально-економічних наслідків вибуху та пожежі на нафтобазі під час бомбардування в м. Харкові // Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки: зб. наук. пр. / УКРНДІЕП – Х.: ПП «Стиль-Іздат», 2024. — Вип.46. — С. 5-19.
2. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин : Постанова КМУ № 1325 від 15 грудня 2021 р. [Чинний від 2021-12-15]

Гуріна Г. І., канд.. хім. наук, доц.;

Кот А. Г., директор ТОВ Algol Chemscales

Апалькова В. Є., студентка 1 курсу

*Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова
м. Харків, Україна*

СУЧАСНІ ТРЕНДИ СТВОРЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ

Одним із ключових напрямків розвитку сучасної лакофарбової галузі України є створення екологічно безпечних матеріалів [1-3]. До них належать порошкові фарби, а також воднодисперсійні та водорозчинні системи, у яких в'язкість регулюється звичайною водою. Окрему групу складають матеріали з пониженим вмістом летких органічних сполук (ЛОС), що відповідають сучасним європейським вимогам до екологічності. Екологічний аспект розвитку сучасної лакофарбової галузі в Україні пов'язаний з введенням в дію в нашій країні двох Технічних регламентів щодо обмеження викидів летких органічних сполук завдяки використанню органічних розчинників у лакофарбових матеріалах для будівель та ремонту колісних транспортних засобів та заборони вмісту свинцю в лакофарбових матеріалах [1, 2]. Важливо, що текст Технічного регламенту [1] відповідає Директиві 2004/42/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 квітня 2004 року про обмеження викидів летких органічних сполук через використання органічних розчинників у певних фарбах і лаках та продуктах повторної обробки автомобілів і транспортних засобів. Таким чином екологічні проблеми розвитку лакофарбової галузі в Європі вирішили на 15 років раніше.

В Технічному регламенті [1] зазначені підкатегорії лакофарбових матеріалів, наприклад, лакофарбові матеріали для матових та глянсових покриттів внутрішніх стін і стель, лакофарбові матеріали для зовнішніх мінеральних поверхонь стін, лакофарбові матеріали для оздоблення деревини, металу чи пластику для внутрішніх/зовнішніх робіт та інші. Для всіх зазначених категорій в регламенті наведені значення максимального вмісту ЛОС у певних категоріях лакофарбових матеріалах типів SB та WB і терміни постадійного введення в дію регламенту як зазначено в табл.1.

Всі зазначені матеріали належать до матеріалів широкого вжитку. Матеріали індустріального призначення та вміст нелетких компонентів в таких матеріалах не підпадають під обмеження технічного регламенту [1] і головними вимогами для індустріальних матеріалів є можливість забезпечення властивостей, що обумовлюють їх сфери застосування.

В даній роботі на основі акрилової смоли у суміші з кополімерними смолами і з добавками функціональних компонентів складено рецептури і розроблено органорозчинні лакофарбові матеріали білого, сірого та чорного кольорів для гідрофобних покриттів з використанням кварцового наповнювача, модифікованого віском. Одержані матеріали можна віднести до підгрупи d табл.1

Таблиця 1 – Значення максимального вмісту ЛОС в лакофарбових матеріалах [1]

№	Підкатегорія матеріалу	Тип	Стадія I, г/л (з 01.01.2021)	Стадія II, г/л (з 01.01.2024)
a	Лакофарбові матеріали для матових покриттів внутрішніх стін та стель (Блиск <25 під кутом вимірювання 60°)	WB SB	75 400	30 30
b	Лакофарбові матеріали для глясових покриттів внутрішніх стін та стель (Блиск > 25 під кутом вимірювання 60°)	WB SB	75 400	30 30
d	Лакофарбові матеріали для обробки деревини, металу або пластику для внутрішніх/зовнішніх робіт	WB SB	150 400	130 300

Органорозчинні матеріали одержували із застосуванням таких приладів як верхньопривідна мішалка для одержання пігментних паст; дисольвер з можливістю змінення числа обертів мішалки для змочування поверхні пігментів розчинами плівкотвірних речовин та попереднього диспергування пігментів і наповнювачів; бісерний млин з частотним варіатором для диспергування пігментів та руйнування агрегатів пігментних часток і рівномірного розподілу пігментів та наповнювачів в об'ємі лакофарбового матеріалу. Визначені фізико-технічні властивості акрилових емалей: час висихання покриття до ступеня 3 при температурі $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ та відносній вологості $(65 \pm 5) \%$ (ДСТУ ISO 9117-1), не більше 20 хвилин, масова частка нелетких речовин $\%$ (ДСТУ ISO 3251), не менше 81, вміст ЛОС, г/л, не більше 296, покривність висушеної плівки, г/м^2 (ДСТУ ISO 842), не більше 100, дисперсність, або ступінь перетиру, мкм

(ДСТУ ISO 1524), не більше 25, адгезія, бали (ДСТУ ISO 4624), не більше 0, еластичність плівки при вигині, мм (ДСТУ ISO 1519), не більше 2, твердість плівки за маятниковим приладом типу ТМЛ, маятник типу А, ум. од (ДСТУ ISO 1522), не менше 0.15, густина, г/см³ (ДСТУ ISO 2811-1) в інтервалі 1,4-1,7.

Із складу сировинних компонентів емалей виключено ZnO для запобігання можливого вмісту свинцю в сировинних компонентах відповідно до [2].

Таким чином, розроблені лакофарбові матеріали відповідають екологічним та технологічним вимогам і можуть бути рекомендовані для одержання покриттів по металевим поверхням та поверхням з деревини і пластмас. Вирішення екологічних питань при виробництві сучасних лакофарбових матеріалів регламентуються нормативно-технічними документами, що забезпечує захист навколишнього середовища та створює умови успішного розвитку лакофарбової галузі у євроінтеграційному напрямку.

Література

1. Технічний регламент щодо обмеження викидів летких органічних сполук унаслідок використання органічних розчинників у лакофарбових матеріалах для будівель та ремонту колісних транспортних засобів <http://surl.li/mqxaJ>
2. Технічний регламент обмеження використання свинцю у лакофарбових матеріалах і сировинних компонентах. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/432-2021-%D0%BF#Text>
3. Galina Gurina, Yevhen Druzhynin, Natalia Vyacheslavovna Saienko, Anna Skripinets. Methods for Optimizing the Content of VOCs to Create Environmentally Friendly Materials for Protective Coatings. Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2023, Vol. 350, pp. 21-30. (SCOPUS).doi:10.4028/p-QrkWR6 <https://www.scientific.net/SSP.350.21>

¹Дмитрієва О. О., д-р екон. наук, ст. наук. співр.;

²Нещерет І. М., канд. філософ. наук;

¹Лисов Б. В.;

¹Мельник Л. В.

¹Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

²Громадська організація Харківський фонд психологічних досліджень. м. Харків, Україна

ІНОВАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ЛОКАЛЬНИХ РЕКРЕАЦІЙНО-МАНДРІВНИХ ПРАКТИК

Криза сучасної урбаноцентричної цивілізації вимушує людину, стомлену життям у місті з його антропогенним тиском на компоненти довкілля, приділяти більше часу відновленню своїх життєвих сил [1]. Серед компонентів антропогенного тиску на навколишнє природне середовище були виділені наступні: забруднення повітря; забруднення водних ресурсів, виробництво та накопичення промислових та побутових відходів, втрата біорізноманіття, та інші [2].

Криза має глибокі соціальні та економічні корені: посилені проблемами екологічного характеру, які виникли внаслідок надмірного зосередження населення та економічної діяльності у великих містах. Основні з яких є:

- стрес і психологічні проблеми: Відірваність від природи, постійний шум, перевантаженість транспорту та високий темп життя сприяють розвитку стресу, нервових і серцево-судинних захворювань.

- соціальне розшарування та злочинність: Висока щільність населення, конкуренція на ринку праці та нерівномірний розподіл ресурсів можуть призводити до безробіття, зuboжіння та зростання рівня злочинності.

- проблеми інфраструктури: Зростання міст перевантажує транспортні системи, енергетичні мережі та комунальне господарство, що призводить до заторів, перебоїв з електропостачанням і водою. [3]

Дієвою стратегією мінімізації впливу цих шкідливих факторів на людський організм є періодичні локальні мандрівки з того місця, де вони активно діють, у екологічно чисті місця на еко-відпочинок, та еко-рекреацію.

Дуже перспективною рекреаційною практикою можуть бути мистецькі акції у екологічно чистих умовах українських еко-поселень.

Одним з фундаторів таких заходів на Харківщині, на нашу думку, був випускник Харківського інженерно-економічного інституту, Олексій Сергієнко (1971-2022). У 2000-ні та 2010-ті роки за його ініціативи, на створеному ним арт майданчику поблизу Пісочина відбувалися різноманітні мистецькі заходи - виставки фотографій та інсталяцій, а також творчі акції.

Серед останніх - еко-арт акція, впродовж якої було зроблено винахід нового зимового виду еко-мистецтва.

Наприкінці зими 2010 року, компанія друзів - цінителів мистецтва на запрошення Олексія Сергієнка прибула на еко-відпочинок. Зима була дуже сніговою та морозною та гостям було запропоновано зліпити сніговика, що й було втілено. Згодом сніг на даху будівлі з початком весни почав танути та через два тижні, коли мандрівники знов приїхали на наступну акцію, то знайшли біля дому замість сніговика еко-скульптуру фантастичної істоти, яка була створена потоками талої води, що падали на сніговика з даху дому. Ігор Нещерет сфотографував цю скульптуру та долучив фото до матеріалів про спонтанно створені та знайдені арт-об'єкти (рис. 1).



Рисунок 1 – Спонтанно створений арт-об'єкт.

Разом з іншими, цю світлину було презентовано на фестивалі «Art-Kyiv Contemporary 2010», що відбувався у Київському Мистецькому Арсеналі та опубліковано у електронній версії провідного українського мистецького видання «Art-Ukraine» [4].

Якщо, враховуючи досвід цієї мистецької еко-арт акції, формалізувати процес виготовлення водно-снігової еко-скульптури, то технологія її створення та фото-документування, може складатися з чотирьох основних етапів:

- вибір часу та місця для встановлення снігової заготовки еко-скульптури з урахуванням траєкторії падіння талої води;
- створення снігової заготовки еко-скульптури у вибраному місці;
- моніторинг та фотофіксація перетворення снігової заготовки на еко-скульптуру під дією талої води;
- обробка та публікація матеріалів створення еко-скульптури.

Отже, створення та популяризацію водно-снігової еко-скульптури, винахід якої відбувся на Харківщині, - є важливим напрямком екологічної та мистецької роботи, яку доцільно розвивати та підтримувати, оскільки вона поєднує в собі екологію, мистецтво та сучасну натурфілософію.

Такі акції несуть у собі величезний рекреаційний потенціал, та сприяють психологічному розвантаженню людини, що є особливо корисним під час повномасштабної збройної агресії РФ проти України.

Водно-снігова еко-скульптура є одним з самих екологічно чистих видів мистецтва, яке серед своїх художніх засобів може використовувати сніг, воду та енергію сонця. Окрім того такі акції не потребують класичних мистецьких навичок.

Література

1. Лисов Б. В., Нещерет І. М., Мовчан Ю. О. Виставковий екотуризм у контексті сучасного філософського мандрівництва/ Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 19-20 вересня 2024 р.) / УКРНДІЕП., 2024. — 275 с.
2. Екологічний атлас Харківської області. Харків 2001. С. 32-46.
3. Л. В. Сергієнко Екологічні наслідки урбанізації в системі загроз безпеці урбанізованим територіям Режим доступу: <https://doi.org/10.32840/pdu.2021.4.21>
4. Igor Neshcheret. Street art discoveries/ Art-Kyiv Contemporary 2010 guide. P.2.

Дмитрієва О. О., д-р екон. наук, ст. наук. співр.;

Цапко Н. С., канд. техн. наук, доц.;

Лисов Б. В.;

Мовчан Ю. О.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕВТРОФУВАННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ (ДЗЗ)

Тези

Сучасні методи спостереження, які умовно поділяються на *контактні* (прямі вимірювання, лабораторні аналізи) та *дистанційні*, дозволяють проводити ефективний контроль. Методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надають унікальні можливості для моніторингу великих акваторій, дозволяючи отримувати миттєву інформацію та переходити від дискретних вимірювань до безперервного просторового зображення екологічних показників.

Протягом більш ніж двадцяти років УКРНДІЕП ведуться дослідження екологічного стану Кам'янського водосховища, у районі міста Горішні Плавні, окрім наземних спостережень використовуються дослідження методами дистанційного зондування Землі. За допомогою матриці дистанційних спостережень було розраховано величину хлорофілу «а» в контрольних точках. Ці дані є основою для оцінювання рівня евтрофування водних об'єктів та визначення їхньої категорії якості

Ключові слова: Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), хлорофіл «а», фікоціанін, ціанобактерії, шкідливе цвітіння водоростей, евтрофікація, якість води, спектральні індекси, машинне навчання.

Шкідливе цвітіння ціанобактерій стає все більш поширеною проблемою у водних екосистемах по всьому світу. Їх зростання пов'язане з процесами евтрофування, спричиненою надходженням поживних речовин у водойми, а також зі зміною клімату, що призводить до серйозних загроз для водних екосистем, здоров'я людей і тварин та соціально-економічної діяльності. Цвітіння ціанобактерій призводить до зниження прозорості води, дефіциту кисню, неприємних запахів і вироблення ціанотоксинів, шкідливих для живих організмів Традиційні методи моніторингу, які включають відбір

проб води в польових умовах і лабораторний аналіз, часто є дорогими, трудомісткими і обмеженими в просторовому і часовому охопленні. У зв'язку з цим існує потреба в ефективних і широкомасштабних методах моніторингу, які можуть доповнити або замінити традиційні підходи.

Запропоновано метод оцінювання рівня «цвітіння» поверхневих водних об'єктів і визначення у подальшому в залежності від нього еколого-соціальної безпеки водокористування на основі сумісного аналізу експериментальних даних етапу наземних спостережень та результатів космічних спостережень.[1]

Використання запропонованого підходу із визначенням космічних показників дозволяє одержати оперативну оцінку рівня розвитку процесів евтрофування поверхневих водних об'єктів, характеризувати розподіл фітопланктону по акваторії за тих чи інших гідрометеорологічних умов і дає чітку інформацію щодо еколого-санітарної ситуації, що формується в місцях питних і технічних водозаборів, зон рекреації та інших ділянках водосховищ. Це дозволяє оперативно приймати необхідні адекватні управлінські рішення щодо зменшення негативних еколого-соціальних наслідків водокористування з евтрофованих водних об'єктів.

На основі сумісного аналізу експериментальних даних етапу наземних спостережень щодо вмісту хлорофілу «а» та результатів космічних спостережень із визначенням коефіцієнта спектральної яскравості (КСЯ) та NDVI одержується оцінка рівня «цвітіння» поверхневих водних об'єктів (табл. 1).

Таблиця 1 – Шкала визначення рівня «цвітіння» ПВО із використанням методів ДЗЗ

Якість поверхневих вод (рівні «цвітіння» води)	КСЯ	NDVI	Вміст хлорофілу «а», мкг/дм³
Чиста (I початкове)	≤ 4	≤0,05	< 1
Слабко забруднена (II слабе)	4 - 19	0,05–0,2	1 - 10
Помірно забруднена (III помірне)	20 - 33	0,2–0,3	11 - 50
Брудна (IV сильне)	34 - 40	0,3–0,4	51 - 100
Дуже брудна (V дуже сильне «гіперцвітіння»)	>40	>0,4	>100

Традиційно хлорофіл «а» використовується як універсальний індикатор біомаси водоростей. Однак він не є специфічним для ціанобактерій, оскільки міститься у всіх

фотосинтезуючих організмах. Це може призводити до неточностей у випадках, коли цвітіння спричинене іншими видами водоростей.

На відміну від нього, фікоціанін є унікальним пігментом, що міститься виключно в ціанобактеріях. Отже, його наявність і концентрація є прямим і більш точним індикатором саме «цвітіння», викликаного цією конкретною групою організмів. Для ДЗЗ це дає можливість:

- *підвищити специфічність моніторингу цвітіння ціанобактерій*, що є важливим для своєчасного виявлення і запобігання поширенню потенційно токсичних видів;
- *поменшити ризик хибних спрацьовувань*, коли високі показники хлорофілу «а» пов'язані з нешкідливими водоростями, а не з ціанобактеріями;
- *покращити точність прогнозування екологічних ризиків*, оскільки токсичність «цвітіння» переважно асоціюється саме з ціанобактеріями.

Таким чином, перехід на використання фікоціаніну дозволяє підвищити якість, точність та інформативність великих досліджень екологічного стану водойм.

Фікоціанін (РС) – це фотосинтетичний пігмент, унікальний для ціанобактерій, що робить його специфічним маркером їх присутності у водоймах. Вимірювання концентрації РС можна використовувати для оцінки біомаси ціанобактерій та прогнозування шкідливого цвітіння. На відміну від хлорофілу «а», який присутній у більшості фітопланктону, РС забезпечує більш специфічну індикацію ціанобактерій.

Методи дистанційного зондування (ДЗЗ) пропонує швидкі, економічно ефективні та великомасштабні спостереження з високою часовою та просторовою роздільною здатністю для моніторингу процесів евтрофування. Деякі датчики на сучасних супутниках здатні вловлювати відбите світло від водної поверхні евтрофної водойми. Методи дистанційного зондування дозволяють подолати обмеження дискретного відбору проб, надаючи інформацію про розподіл цвітіння на великих площах одночасно. Дистанційне зондування процесів евтрофування у тому числі вмісту фікоціанінів, є перспективним інструментом для моніторингу та оцінки стану водних екосистем [18].

Фікоціанін має характерний пік поглинання в помаранчево-червоній області спектра, близько 620 нм [2]. Він також має пік флуоресценції близько 650 нм [10]. Ці спектральні особливості створюють потенціал для виявлення та кількісного визначення РС за допомогою інструментів дистанційного зондування [6]. Спектральний діапазон 600-630 нм є особливо важливим для виявлення РС [13].

Смуги навколо 665 нм, 705 нм і 740 нм (наприклад, на супутниках Sentinel-2 MSI) були використані для розробки алгоритмів кількісного визначення концентрації PC. «Помаранчева контр-смуга» (590-635 нм) на супутниках Landsat 8/OLI була використана для моніторингу ціанобактерій, кількісно визначених за допомогою PC [20]. Також були розроблені індекси, такі як Індекс ціанобактерій (CI), для використання з такими датчиками, як MERIS і Sentinel-3 OLCI [7]. Індекс спектральної форми (SSI) використовує вплив фікоціаніну на спектри відбиття, враховуючи флуоресценцію хлорофілу-«а» [19].

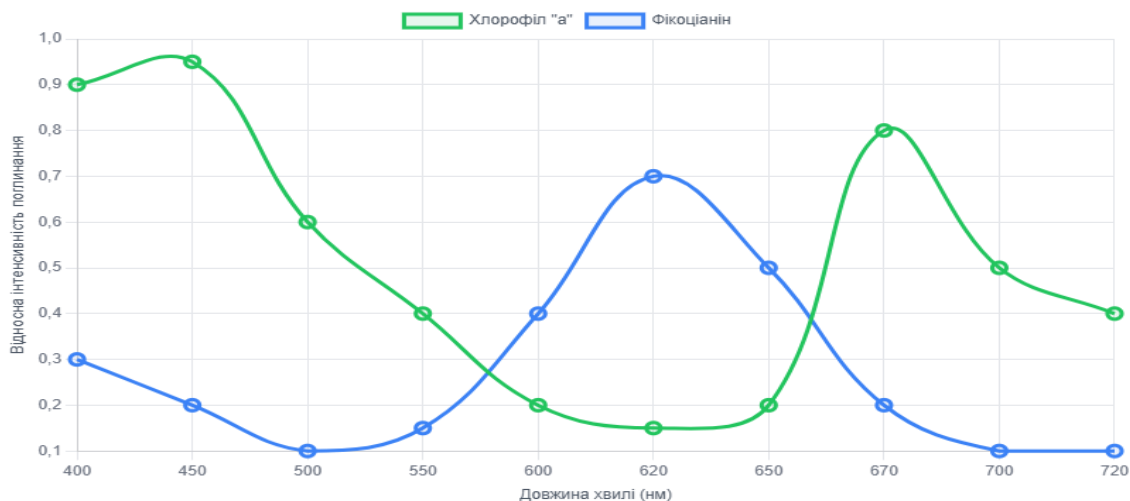


Рисунок 1 – Графік візуалізації спектральних «відбитків» хлорофілу «а» та фікоціаніну.

На графіку (рис. 1) по горизонтальній осі відкладено *довжину хвилі світла* в нанометрах (нм), а по вертикальній — *відносну інтенсивність поглинання*. Чим вище крива, тим сильніше пігмент поглинає світло на цій довжині хвилі.

Крива *хлорофілу «а»* (позначена зеленим кольором) має два основні піки поглинання. Перший, дуже високий, розташований у синій області спектра (близько 450 нм), а другий, також значний, — у червоній (близько 670 нм). Це пояснює, чому рослини та водорості, що містять хлорофіл «а», здаються зеленими — вони поглинають синє та червоне світло, відбиваючи зелене.

Крива *фікоціаніну* (позначена синім кольором) має свій виразний пік поглинання в помаранчево-червоній області спектра, приблизно на 620 нм. Це є відмінністю, що робить фікоціанін чудовим індикатором для ДЗЗ. У той час як хлорофіл «а» поглинає світло в цьому діапазоні менш інтенсивно, фікоціанін демонструє тут виражений максимум.

Основні аерокосмічні датчики, що використовуються для виявлення фікоціанінів, Sentinel-2 MSI, Sentinel-3, OLCI, Landsat 8 OLI, MODIS, гіперспектральні датчики (аерокосмічні, такі як HICO, PRISMA) [3, 9, 18, 20, 21, 25]. (табл. 2)

Слід зазначити, що гіперспектральна зйомка з БПЛА також демонструє високу точність виявлення фікоціаніну, однак, у зв'язку з військовими діями, що тривають на території України, використання БПЛА для обстеження водних об'єктів наразі є неможливим.

Таблиця 2 – Порівняння супутникових сенсорів для виявлення фікоціанінів

Супутник	Сенсор	Ключові спектральні діапазони (нм)	Просторова роздільна здатність	Часова роздільна здатність	Можливість оцінки ціанобактерій (PC)
Sentinel-3	OLCI	600-630	300	1-3	Так
MERIS	MERIS	600-630	300	-	Так
Sentinel-2	MSI	665, 705, 740	10-20	2-5	Так
Landsat 8	OLI	590-635	30	16	Так
MODIS	MODIS	667, 551	250-1000	1-2	Так
HICO	HICO	400-900 (багато вузьких діапазонів)	90	-	Так
PRISMA	PRISMA	400-2500 (багато вузьких діапазонів)	30	-	Так

Емпіричні моделі встановлюють статистичні взаємозв'язки між відбивною здатністю дистанційного зондування та концентраціями PC, виміряними під час польових досліджень за допомогою регресійного аналізу. Напівемпіричні моделі включають відомі оптичні властивості води та її складових для отримання коефіцієнтів поглинання PC [5].

Алгоритми машинного навчання, такі як градієнтне підсилення дерев (Gradient Boosting Trees, GBT), машини опорних векторів, штучні нейронні мережі та мережі змішаної щільності (MDN) все частіше використовуються для вилучення даних про PC. Регресія GBT показала високу точність для вилучення даних про PC з зображень MODIS і OLCI. Нейронні мережі використовувалися для розробки алгоритмів в Балтійському морі [4]. MDN продемонстрували надійність для оцінки PC з використанням гіперспектральних датчиків, таких як HICO і PRISMA [20].

Алгоритми співвідношення смуг використовують відбиття на певних довжинах хвиль для оцінки концентрації РС. Приклади включають алгоритми, які використовують співвідношення відбиття при 709 нм до 620 нм або 665 нм [15].

Також використовуються нормалізований індекс хлорофілу (NDCI) та індекс поверхневого цвітіння водоростей (SABl) [7]. Було розроблено трисмуговий алгоритм (PC3) для визначення концентрації РС з урахуванням впливу хлорофілу «а» [23].

Дистанційне зондування дозволяє візуалізувати концентрації РС у водних об'єктах, виявляючи просторову неоднорідність. Тематичні карти концентрацій РС можуть бути створені на основі рівнів тривоги, які можуть бути використані такими організаціями, як ВООЗ. Наприклад, гіперспектральні дані аерофотозйомки були використані для прогнозування просторового розподілу концентрацій РС у річках [10].

Концентрація РС використовується як індикатор для характеристики біомаси ціанобактерій і, відповідно, інтенсивності цвітіння. Алгоритми можуть бути використані для оцінки біомаси ціанобактерій та картографування інтенсивності цвітіння. Індекс ціанобактерій (C_{cyano}) дозволяє відрізнити ціанобактерії від інших водоростей та оцінити концентрацію клітин [22]. Псевдоіндекс Фореля-Уле (P-FUI) дозволяє визначити цвітіння ціанобактерій та його інтенсивність (висока, середня, низька) на основі відмінностей у кольорі води [8].

Хлорофіл «а» і хлорофіл «b» також поглинають світло в області 620 нм, що потенційно може перешкоджати виявленню фікоціанінів. Додаткові пігменти також можуть перекривати пік поглинання РС [24]. Неточна атмосферна корекція може призвести до помилок у відновлених концентраціях фікоціанінів [11]. Атмосферна корекція над каламутними внутрішніми водами може бути особливо складною. Каламутність, спричинена завислими осадами і забарвленими розчиненими органічними речовинами (ЗРОР), може впливати на оптичні властивості води і заважати виявленню РС. Алгоритми часто не враховують ЗРОР і триптичне поглинання, що може призвести до переоцінки поглинання пігменту [16].

Більшість сучасних супутників не мають спектральних діапазонів, які дозволяють однозначно ідентифікувати спектр відбиття фікоціанінів. Просторова роздільна здатність може обмежувати застосування методів ДЗЗ до менших водойм [17]. Часова роздільна здатність не завжди може відображати швидку динаміку цвітіння водоростей [2]. Залежно від виду та умов навколишнього середовища може спостерігатися мінливість вмісту фікоціаніну в ціанобактеріях [21]. Вміст фікоціаніну може змінюватися внутрішньоклітинно. Лабораторні методи вимірювання фікоціаніну

ще не повністю стандартизовані [14]. Також бракує стандартизації алгоритмів та метрик продуктивності [13].

Майбутні гіперспектральні місії, такі як PACE, обіцяють більш точні дані РС завдяки високій спектральній роздільній здатності [12]. Гіперспектральні дані дозволяють розробляти більш складні алгоритми, які можуть краще відрізняти фікоціанін від інших пігментів. Синергетичне використання даних з різних супутників (наприклад, MODIS і OLCI, Sentinel-2 і Sentinel-3) може забезпечити більш повне просторове і часове покриття. Інтеграція супутникових, аерокосмічних (включаючи БПЛА) і наземних даних може призвести до створення більш надійних систем моніторингу. Складні алгоритми, включаючи моделі машинного навчання, розробляються для підвищення точності і надійності даних за РС [2]. Методи глибокого навчання можуть запропонувати подальші поліпшення в аналізі складних спектральних даних. Ключовою сферою на найближче майбутнє – є розробка універсальних алгоритмів, придатних для різних типів вод і регіонів.

Література

1. Дмитрієва О.О. Екологічно безпечне водокористування у населених пунктах України. – К.: Рада по вивченню продуктивних сил України НАН України, 2008. – 459 с.
2. Phycocyanin Monitoring in Some Spanish Water Bodies with Sentinel-2 Imagery – MDPI. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/20/2866>
3. Пашенко Р.Е., Радчук В.В., Красовський Г.Я. та ін. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA : монографія / під ред. С.О. Довгого. – Х: ФОП Пономаренко Є.В., 2013. 316 с.
4. Comparison of phycocyanin concentrations in Chaohu. – Frontiers. Режим доступу: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.922505/full> 3
5. The Cyanobacteria Assessment Network (CyAN) - NOAA, <https://cdn.coastalscience.noaa.gov/page-attachments/HABHRCA/IWG-CyAN-HABs-Monitoring-Forecasting.pdf>
6. Mapping Freshwater Algal Blooms with Remote Sensing - LG Sonic. Режим доступу: <https://www.lgsonic.com/freshwater-remote-sensing/>
7. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie | Request PDF - ResearchGate. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/222547958_Phycocyanin_detection_from LANDSAT_TM_data_for_mapping_cyanobacterial_blooms_in_Lake_Erie

[SAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie](#)

8. Innovative Remote Sensing Identification of Cyanobacterial Blooms Inspired from Pseudo Water Color - MDPI. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/1/215>
9. The Search for a MODIS Image Product for Mapping Phycocyanin Pigment - NOAA Great Lakes Environmental Research Laboratory. Режим доступа: <https://www.glerl.noaa.gov/res/projects/ifyle/proposals/vincent-leshkevich.doc>
10. Quantification of Phycocyanin in Inland Waters through Remote. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/16/3335>
11. Advancing cyanobacteria biomass estimation from hyperspectral observations - the NOAA Institutional Repository. Режим доступа: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/50675/noaa_50675_DS1.pdf
12. Phycocyanin sensors as an early warning system for cyanobacteria blooms concentrations: a case study in the Rotorua lakes - Taylor & Francis Online. Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00288330.2019.1617322>
13. Phycocyanin concentration retrieval in inland waters: A comparative review of the remote sensing techniques and algorithms | Request PDF - ResearchGate. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/325391334_Phycocyanin_concentration_retrieval_in_inland_waters_A_comparative_review_of_the_remote_sensing_techniques_and_algorithms
14. Challenges for mapping cyanotoxin patterns from remote sensing of cyanobacteria - CIGLR. Режим доступа: https://ciglr.seas.umich.edu/wp-content/uploads/2017/03/Stumpf_etal.pdf.pdf
15. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments. Режим доступа: chlorophyll a and phyc. Режим доступа: <https://www.csum.edu/oceanography/media/2008-randolph-et-al.pdf>
16. (PDF) A remote sensing tool for near real-time monitoring of harmful algal blooms and turbidity in reservoirs - ResearchGate. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/369529536_A_remote_sensing_tool_for_near_real-time_monitoring_of_harmful_algal_blooms_and_turbidity_in_reservoirs
17. CONFOUNDING CONSTITUENTS IN REMOTE SENSING OF. Режим доступа: <https://scholarworks.indianapolis.iu.edu/bitstreams/ad117408-1bd5-405f-8d51-8df8569a458a/download>
18. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. Режим

доступу: https://www.researchgate.net/publication/232041562_Remote_sensing_of_the_cyanobacterial_pigment_phycocyanin_in_turbid_inland_water

19. Phycocyanin Remote Sensing of Water Resources. Режим доступа: <https://water.rs.umn.edu/phyococyanin>

20. Monitoring Phycocyanin with Landsat 8/Operational Land Imager Orange Contra-Band. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3298/9/3/40>

21. Using Sentinel-3 Satellite Imagery for Cyanobacteria Development Monitoring - ScholarWorks@GVSU. Режим доступа:

<https://scholarworks.gvsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1898&context=honorsprojects>

22. Remote Sensing of Harmful Algal Blooms - Sanibel-Captiva Conservation Foundation. Режим доступа: <https://sccf.org/blog/2021/11/09/remote-sensing-of-harmful-algal-blooms/>

23. A novel remote sensing algorithm to quantify phycocyanin in cyanobacterial algal blooms - Politecnico Di Milano. Режим доступа:

http://www.bibliosearch.polimi.it/discovery/fulldisplay?docid=cdi_crossref_primary_10_1088_1748_9326_9_11_114003&context=PC&vid=39PMI_INST:VU1&lang=it&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=sub%2Cequals%2CAbsorption%20spectra%20%2CAND&mode=advanced&offset=0

24. (PDF) A novel remote sensing algorithm to quantify phycocyanin in. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/267696510_A_novel_remote_sensing_algorithm_to_quantify_phycocyanin_in_cyanobacterial_algal_blooms

25. Assessment of Estimated Phycocyanin and Chlorophyll-a Concentration from PRISMA and OLCI in Brazilian Inland Waters: A Comparison between Semi-Analytical and Machine Learning Algorithms - Apollo. Режим доступа: <https://www.repository.cam.ac.uk/items/3b4b4dd5-8dfc-45f6-b777-9ec2d96b8381>

Дудар Т. В., д-р техн. наук, проф.;

Беленок В. Ю., канд. фіз.-мат. наук, доц.;

Дубик О. М., канд. техн. наук, доц.;

Бондар Д. С., магістрант;

Дудар В. В., аспірант

Державний університет «Київський Авіаційний Інститут», м. Київ, Україна

Титаренко О. В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.;

Топольницький М. В., д-р техн. наук, ст. наук. співр

ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України», м. Київ, Україна

АКТИВІЗАЦІЯ РОЗВИТКУ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У РАЙОНАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Прискорення зміни клімату означає зростання швидкості змін у кліматичних системах Землі, включаючи територію України. У сучасних умовах привертається особлива увага до взаємного впливу інфраструктурних об'єктів та геологічного середовища, зокрема, розвитку екзогенних геологічних процесів та їх взаємодії з ендегенними. Під екзогенними ми розуміємо природні процеси, що відбуваються на та близько до поверхні Землі та безпосередньо залежать від дії зовнішніх факторів, таких як атмосферні опади, вітрова активність, температурні коливання та діяльність людини. Ці процеси (ерозія, зсуви, суфозія, карстоутворення та підтоплення), які мають особливе значення для забезпечення екологічної безпеки будь-якого регіону, становлять потенційну загрозу для стабільності інженерних споруд, особливо в техногенно навантажених районах, якими є Київ і Київська область.

Актуальність теми дослідження полягає у необхідності вивчення взаємозв'язку між функціонуванням інфраструктурних об'єктів (включаючи аеродромні комплекси) та інтенсифікацією небезпечних геологічних процесів, а також у розробці заходів з мінімізації їхнього впливу. Це особливо важливо в умовах урбанізованих територій, де безпека населення, стабільність інфраструктури та екологічна рівновага залежать від своєчасного реагування на геодинамічні зміни.

Метою цього дослідження є аналіз активізації екзогенних геологічних процесів у районі розташування аеродромів у Західній частині Київської області та оцінка ступеня їх розвитку, що згодом дасть можливість зробити обґрунтування проведення моніторингових та захисних заходів. Робота базується на аналізі даних геологічних та

гідрогеологічних обстежень, космічних зйомок, літературних джерел, а також аналітичних узагальненнях.

Територія дослідження. Геологічна структура Києва та Київщини складна, представлена потужним чохлам четвертинних відкладень, що перекривають давніші палеогенові та неогенові породи. Фундаментом слугує Український кристалічний щит, на околицях якого виходять магматичні породи. В регіоні переважають піски, глини, вапняки, мергелі, а також родовища торфу, кварцового піску та інших будівельних матеріалів. Це обумовлює необхідність ретельних геологічних досліджень при будівництві та обслуговуванні інфраструктурних об'єктів, особливо біля річок, де присутні нестабільні піщано-глинисті утворення.

Ми зосереджуємо дослідження у західній частині Київської області, де функціонують важливі стратегічні об'єкти - військові та цивільні аеродроми, і де спостерігаються зміни у структурі геологічного середовища. Діяльність аеродромів супроводжується щоденними механічними навантаженнями, змінами у гідрологічному режимі території, ущільненням ґрунтів, порушенням водного балансу, що провокує активізацію екзогенних процесів.

Характеристика екзогенних геологічних процесів. Екзогенні геологічні процеси є невід'ємною складовою динамічного розвитку земної поверхні. Вони охоплюють різноманітні явища, що відбуваються в приповерхневій частині літосфери під дією зовнішніх природних і антропогенних факторів. До екзогенних процесів відносяться ерозія, дефляція, зсуви, обвали, суффозія, карстоутворення, осідання та інші явища, які формуються внаслідок взаємодії гідросфери, атмосфери, біосфери та людської діяльності з геологічним середовищем. Безпосередньо в районі дослідження розвиваються заболочення та підтоплення (рис. 1).

Ці процеси мають значний вплив на стабільність інженерних споруд, стан ґрунтів, ландшафтів та екологічну безпеку територій. Їхній розвиток ускладнюється в районах техногенного навантаження, зокрема у зонах, прилеглих до аеродромів, де спостерігається порушення структури ґрунтового покриву, зміни в гідрологічному режимі та забруднення навколишнього середовища продуктами нафтопереробки, мастил, паливно-мастильних матеріалів (ПММ), важкими металами.

У межах аеродромних зон екзогенні процеси можуть проявлятися з більшою інтенсивністю. Наприклад, відсутність природного рослинного покриву сприяє ерозії; штучні зміни рівня ґрунтових вод можуть спричинити просадку; інфільтрація забруднених стоків – активацію хімічного розмивання та локального карстоутворення.

Розуміння особливостей цих процесів є надзвичайно важливим для забезпечення стабільності інфраструктури, екологічної рівноваги та безпеки життєдіяльності населення.

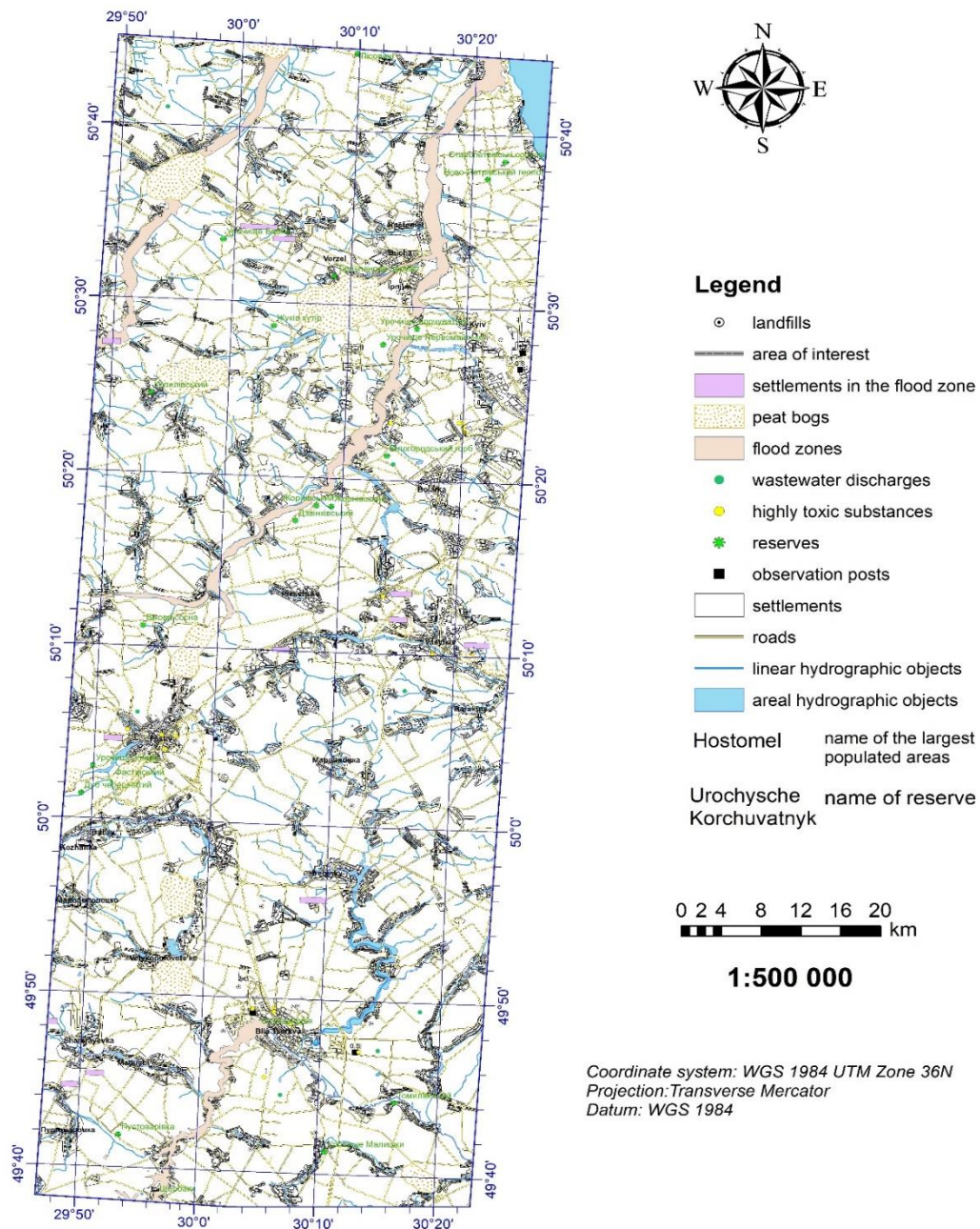


Рисунок 1 – Розвиток екзогенних геологічних процесів на території південно-західної частини Київської області (складено за матеріалами екологічної карти Київської області Г. Я. Красовського).

Фактори формування екзогенних процесів у Київській області. Територія Київської області, а особливо її західна частина, характеризується поєднанням природних і антропогенних факторів, які безпосередньо впливають на формування екзогенних процесів. Одним із ключових чинників є геологічна будова. У регіоні переважають лесові суглинки, супіски та піски, які мають високу проникність і схильність до осідань, розмивання, а у разі зволоження – до суффозії та зсувів.

Клімат також суттєво впливає на геодинамічну ситуацію. Помірно-континентальний клімат з достатнім рівнем опадів (в середньому 600–700 мм на рік) створює умови для поверхневого стоку, який активізує водну ерозію. Особливо це актуально в періоди танення снігу та інтенсивних літніх злив, коли велика кількість води за короткий час змінює гідрологічний баланс ґрунтів.

Водонасичення лесових порід часто призводить до втрати ними механічної міцності, особливо при порушенні природної дренажної системи через техногенне втручання. У зонах впливу аеродромів, де ґрунти ущільнюються, заливаються бетоном або зазнають вібраційного впливу, можливе локальне перерозподілення підземних вод, що є тригером для розвитку осідань і підтоплення.

Антропогенний чинник має, безперечно, домінуюче значення. Будівництво та експлуатація злітно-посадкових смуг, ангарів, магістралей порушує природні умови формування рельєфу та гідрології. Техногенні навантаження, такі як витoki пального, накопичення відходів, зміна структури ґрунтів через ущільнення технікою, змінюють гідрогеологічні умови, створюючи передумови до виникнення небезпечних екзогенних явищ.

Загальний огляд аеродромів Західної частини Київської області ми наразі не розглядатимемо, зокрема по причині акценту на геологічних процесах на території дослідження, де вони знаходяться, і залишимо цей огляд для наступних публікацій.

Геоморфологічна характеристика районів аеродромів. Території розташування інфраструктурних об'єктів західної частини Київської області мають свої специфічні геоморфологічні риси. Вони знаходяться переважно в межах Придніпровської височини – платоподібного геоморфологічного району, що характеризується переважно рівнинним або слабохвилястим рельєфом, розчленованим річковими долинами, балками, ярами.

Переважаючі ґрунти – лесові суглинки, які мають високу водопроникність, проте при зволоженні стають нестабільними, втрачаючи несучу здатність. Балкові системи поблизу Білої Церкви та Василькова є природними дренажами, але при порушенні

рослинного покриву вони перетворюються на джерело ерозійних процесів. Особливо це помітно у весняно-літній період, коли опади сприяють інтенсивному стіканню води по схилах.

У геоморфологічному плані аеродромні майданчики створюються як максимально вирівняні платформи, що у разі помилок проектування чи будівництва порушують рівновагу природного середовища. При цьому лінійні споруди (ЗПС, руліжні доріжки) спрямовують поверхневі води у невластиві для них напрямки, що спричиняє підмивання схилів і підтоплення низин.

Вплив аеродромної діяльності на розвиток екзогенних процесів.

Аеродромна діяльність має відчутний вплив на екзогенні геологічні процеси як у безпосередній зоні інфраструктури, так і в навколишніх територіях. Цей вплив має багатокомпонентний характер.

Передусім, механічне ущільнення ґрунтів під час зведення інженерних споруд змінює структуру порового простору, що впливає на гідродинаміку – зменшується фільтраційна здатність верхнього шару, але посилюється рух води у нижчих горизонтах. У поєднанні з порушенням рельєфом це створює умови для локального підтоплення, підняття рівня ґрунтових вод.

Техногенні вібрації, викликані злетами та посадками літаків, впливають на ґрунти, особливо на схилах та в місцях, де вони ослаблені вологістю або раніше порушеними породами. Це активізує зсувні та просадні процеси, які є особливо небезпечними для злітно-посадкових смуг.

Забруднення ПММ та хімічними речовинами призводить до зміни хімічного складу ґрунтових вод. Це, в свою чергу, активізує біогеохімічні процеси розчинення порід, які є основою для розвитку суффозії або навіть локального карстоутворення.

Наслідки екзогенних процесів для навколишнього середовища та інфраструктури. Наслідки активізації екзогенних геологічних процесів у районах аеродромів можуть бути масштабними і різноплановими. Перш за все, це впливає на геотехнічну стабільність територій. Підтоплення викликає надмірне зволоження ґрунтів, що призводить до зниження їх несучої здатності. Як наслідок — деформації покриття злітно-посадкових смуг, просідання асфальту, руйнування інженерних мереж. У критичних випадках це може створити загрозу авіаційній безпеці.

Ерозія проявляється переважно у вигляді руйнування відкритих ділянок ґрунтового покриву, схилів та берегів поблизу дренажних або зливових систем аеродромів. Неправильно організоване водовідведення сприяє утворенню глибоких

промоїн, що поступово поширюються та охоплюють все більші площі. Це негативно впливає як на саму інфраструктуру, так і на навколишнє середовище — деградує рослинність, порушується природний дренаж, виникає загроза біорізноманіттю.

Крім технічних проблем, екзогенні процеси можуть завдавати шкоди довкіллю — забруднення підземних і поверхневих вод внаслідок зміни гідродинамічних режимів, осушення природних боліт, зміщення русел малих річок. Усі ці зміни негативно впливають на екосистеми та здоров'я місцевого населення.

Наші подальші дослідження будуть направлені на використання геоінформаційних технологій — вони дозволяють створювати просторові моделі небезпеки, оперативно виявляти «гарячі точки», аналізувати динаміку змін. Створення цифрових карт ризиків, візуалізація всіх чинників, що впливають на динаміку екзогенних процесів, надає змогу не лише прогнозувати потенційні загрози, але й планувати заходи з їх упередження. Використання супутникових знімків високої роздільної здатності, аерофотозйомки з БПЛА (дронів), лазерного сканування (LiDAR) дозволить створити тривимірні моделі рельєфу і зон потенційної небезпеки. Це дасть змогу більш точно локалізувати ділянки ризику та оперативно реагувати на будь-які зміни.

Висновки

Процеси активізації розвитку екзогенних геологічних процесів в районах розташування об'єктів критичної інфраструктури зумовлені численними факторами природного і антропогенного характеру. Функціонування аеродромів як об'єктів критичної інфраструктури у Західній частині Київської області впливає на активізацію таких процесів, які становлять загрозу як для самої інфраструктури, так і для навколишнього середовища. Виявлено, що серед найбільш характерних процесів у цьому регіоні переважають підтоплення, заболочування в долинах річок, ерозія, локальні зсуви, які посилюються внаслідок неправильного водовідведення, інтенсивного використання ґрунтів та зміни природного гідрологічного режиму.

Ці процеси можуть спричиняти серйозні інженерно-геологічні, а також екологічні наслідки: забруднення ґрунтових вод, деградація ландшафтів, втрата біорізноманіття в межах антропогенно змінених територій.

Література

1. Державна служба геології та надр України. Геоінформаційний портал//geo.gov.ua. URL: <https://www.geo.gov.ua>

2. Державна екологічна інспекція України. Аналітичні матеріали щодо стану довкілля (2023). URL: <https://dei.gov.ua>
3. Національний гідрометеорологічний центр. Кліматичні умови Київської області. URL: <https://meteo.gov.ua>
4. Геологічна карта України. 1:200 000. Державна геологічна служба України. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/geology.html>
5. Portal "Open Geospatial Data Ukraine"- геопросторові відкриті дані Держгеокадастру. URL: <https://map.land.gov>.
6. Закон України "Про національну інфраструктуру геопросторових даних" (2020): прийнятий 13 квіт. 2020 р. № 554-IX. Відомості Верховної Ради України, № 37, Ст.277.
7. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA / Пащенко Р.Е., Радчук В.В., Красовський Г.Я. та ін. // Під ред. С.О. Довгого. – Київ: ФОП Пономаренко Є. В., 2013. – 316 с.
8. Греков Л.Д., Красовський Г.Я., Трофимчук О.М. Космічний моніторинг забруднення земель техногенним пилом. – К.: Наук. думка, 2007. – 123 с.
9. Карпінський Ю. О., Лященко А. А. (2006). Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні. К.: НДІГК, 106 с.
10. Геологія з основами геоморфології: текст лекцій / Укладач: Є.О. Варивода. – НУЦЗУ, 2017. – 120 с.
11. Ковальчук І. П. Динаміка сучасних геоморфологічних процесів: стаціонарні дослідження / І. П. Ковальчук // Фізична географія та геоморфологія. - 2016. - Вип. 2. - С. 17-22. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/fiz_geo_2016_2_4.
12. ЗВІТ про стратегічну екологічну оцінку проекту Стратегії розвитку Київської області на 2021-2027 роки (нова редакція) URL: <https://koda.gov.ua/wp-content/uploads/2025/03/zvit-seo-.pdf>.
13. Rogozhin O., Trofymchuk, V., & Khlobystov, I. (2025). Possible models of regional environmental and economic assessment of engineering and geological hazards impact on the stability of buildings and structures. *Environmental Safety and Natural Resources*, 54(2), 84–100. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.84-100>.
14. Zhyrnov P. and Solomakha I. (2022). Engineering-geological zoning as a scientific-methodical basis for scheme's development of engineering-construction assessment (on the example of Irpin town Kyiv region). *Geodynamics* 2(33)/2022, 115-132. <https://science.lpnu.ua/jgd/all-volumes-and-issues/2332022/engineering-geological-zoning-scientific-methodical-basis-schemes>.

Душкін С. С., канд. техн. наук, доц.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ОГЛЯД ОНЛАЙН-РЕСУРСІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ: ПРАКТИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ДЛЯ СТУДЕНТІВ-ЕКОЛОГІВ

Анотація. У сучасному світі, що характеризується стрімким розвитком інформаційних технологій, моніторинг стану навколишнього середовища набуває особливої актуальності. Використання сучасних онлайн-ресурсів та програмного забезпечення дозволяє отримувати, обробляти та аналізувати екологічні дані з безпрецедентною швидкістю та точністю. Ця стаття присвячена огляду ключових веб-платформ та програмних продуктів, які можуть бути ефективно інтегровані в освітній процес під час вивчення дисципліни «Моніторинг довкілля». Особлива увага приділяється вільному та відкритому програмному забезпеченню, що надає студентам можливість самостійного дослідження без додаткових фінансових витрат. У статті розглядаються передумови створення глобальних систем моніторингу, їхня структура, а також особливості організації екологічного моніторингу в Україні. На основі аналізу ресурсів та інструментів надаються рекомендації щодо їхнього практичного застосування у навчальній та науковій роботі.

Ключові слова: моніторинг довкілля, екологічні дані, екологічна освіта, цифрові інструменти

Сучасний розвиток суспільства нерозривно пов'язаний із техногенним навантаженням на навколишнє природне середовище, що спричиняє комплексні екологічні виклики. Погіршення якості повітря та водних ресурсів, деградація ґрунтів та втрата біорізноманіття вимагають не лише негайного реагування, а й систематичного та об'єктивного контролю. У цьому контексті моніторинг стану довкілля стає критично важливою складовою державної політики, наукових досліджень та освітніх програм. Він є основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень та розробки ефективних стратегій сталого розвитку.

Передумови створення систем моніторингу сягають другої половини ХХ століття, коли зростання промислового виробництва інтенсифікувало антропогенний вплив на біосферу. Локальні спостереження за окремими параметрами довкілля

трансформувалися в ідею створення комплексних, взаємопов'язаних систем, здатних збирати, аналізувати та прогнозувати зміни на регіональному та глобальному рівнях. Цей процес призвів до появи міжнародних ініціатив, таких як Глобальна система моніторингу навколишнього середовища (далі – ГСМОС (Global Environment Monitoring System (GEMS)), що об'єднала зусилля різних країн і організацій. Сьогодні, завдяки стрімкому прогресу в галузі сенсорних технологій, супутникових систем та мережевих комунікацій, моніторинг перейшов від періодичних вимірювань до безперервного потоку даних у реальному часі [1].

Метою цієї статті є надання систематизованого огляду ключових онлайн-ресурсів та програмного забезпечення, які дозволяють отримувати, візуалізувати та аналізувати дані екологічного моніторингу.

Ефективний моніторинг не може бути обмежений територією однієї країни; він вимагає міжнародної співпраці та стандартизації методів. Це стало основною передумовою для створення ГСМОС, яка функціонує під егідою Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP). Метою ГСМОС є збір, обробка та аналіз даних про стан довкілля по всьому світу для оцінки глобальних трендів і загроз. В рамках цієї системи функціонують різні програми, що спеціалізуються на моніторингу якості повітря (GEMS/Air), водних ресурсів (GEMS/Water) та біорізноманіття. Важливим компонентом глобального моніторингу є європейська програма Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>), яка надає супутникові дані для спостереження за станом атмосфери, океанів, суші та клімату. Ці дані є безкоштовними та загальнодоступними, що робить їх безцінним джерелом для студентських досліджень.

Міжнародні програми екологічного моніторингу охоплюють широке коло завдань - від відстеження глобальних кліматичних змін до оперативного виявлення локальних екологічних загроз. Європейська програма Copernicus забезпечує безкоштовний доступ до супутникових даних Sentinel (<https://www.sentinel-hub.com>), що дозволяють оцінювати стан атмосфери, океанів і суходолу, виявляти зміни рослинного покриву, масштаби пожеж чи повеней Система FIRMS (Fire Information for Resource Management System <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>) від NASA надає дані про активні осередки пожеж та теплові аномалії в режимі близькому до реального часу, що особливо ціно для аналізу екологічних ризиків у лісових і степових регіонах. Платформа Windy (<https://www.windy.com>) в інтерактивному форматі відображає атмосферні процеси, включно з напрямками та швидкістю вітру, температурними аномаліями, опадами та іншими метеорологічними параметрами, що важливо для

моделювання розповсюдження забруднювачів. Для морських екосистем корисним є використання глобальних баз даних морських течій, які допомагають відстежувати перенесення забруднень у прибережних і відкритих водах.

Організація моніторингу в Україні здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» [2]. Національна система моніторингу є багатокомпонентною і включає моніторинг атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод, ґрунтів, ландшафтів, надр, а також джерел викидів. Центральним органом, що відповідає за організацію та координацію моніторингу, є Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. На практиці, моніторинг здійснюється у співпраці з Українським гідрометеорологічним центром (УкрГМЦ), Державним агентством водних ресурсів України та іншими відомствами. Дані з українських мереж спостережень є основою для екологічних прогнозів та розробки державних програм. Доступ до цих даних, хоч і в деякій мірі обмежений, поступово стає більш відкритим завдяки цифровізації та розвитку державних інформаційних систем.

Окреме місце у структурі національних онлайн-ресурсів займає портал EcoZagroza (<https://ecozagroza.gov.ua>), який в інтерактивному форматі відображає екологічну шкоду, завдану внаслідок збройної агресії РФ проти України.

Для ефективного аналізу даних екологічного моніторингу майбутнім фахівцям необхідно володіти сучасними цифровими інструментами. Їх можна умовно розділити на дві категорії: онлайн-ресурси для отримання даних та програмне забезпечення для їхньої обробки.

До онлайн ресурсів належать:

- моніторинг якості повітря: IQAir - одна з найпопулярніших платформ з детальними даними про якість повітря в реальному часі, прогнозами та історичними даними (<https://www.iqair.com>); World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index - показує індекс якості повітря (AQI) в реальному часі для понад 100 країн (<https://aqicn.org/map>); PurpleAir – це мережа датчиків якості повітря, які здебільшого належать приватним особам (<https://www.purpleair.com/map>); BreezoMeter - пропонує не лише дані про якість повітря, а й інформацію про пилок і погодні умови. Вона використовує складні алгоритми для об'єднання даних з різних джерел, надаючи деталізовані прогнози на кілька днів уперед (<https://www.breezometer.com>); OpenAQ – некомерційна організація, яка об'єднує дані про якість повітря з відкритих державних станцій моніторингу по всьому світу (<https://openaq.org>); Plume Labs - є частиною AccuWeather, надає прогнози

якості повітря за допомогою свого індексу Airlike (<https://air.plumelabs.com>); Агентство з охорони довкілля США надає дані про якість повітря по всій території Сполучених Штатів. Їх інструмент AirNow пропонує карту в реальному часі та прогнози (<https://www.epa.gov/air-quality>), European Environment Agency (EEA) пропонує дані про якість повітря для країн Європи через свій European Air Quality Index (<https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index>); Український проєкт від розробників порталу ЛУН. Він збирає дані з власних датчиків, встановлених у різних містах України (<https://misto.lun.ua/air>);

– моніторинг якості води: Water Quality Portal (WQP) - спільний проєкт трьох державних агентств США (EPA, USGS та USDA). Портал надає доступ до величезної бази даних про якість води, зібраної з тисяч локацій по всій країні (<https://www.waterqualitydata.us>); Global Drinking Water Quality Data - база даних Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) містить інформацію про якість питної води, зібрану з різних країн світу. Вона зосереджена на показниках, що мають важливе значення для здоров'я людини ([https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/monitoring/global-drinking-water-quality-database-\(gdwqd\)](https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/monitoring/global-drinking-water-quality-database-(gdwqd))); The Waterkeeper Alliance - некомерційна організація, яка має глобальну мережу партнерів, що моніторять якість води в річках, озерах і прибережних зонах (<https://waterkeeper.org>); NASA Earthdata - супутникові дані, які допомагають в оцінці якості води, зокрема, в моніторингу цвітіння водоростей, каламутності та температури поверхні води. Ці дані мають глобальне покриття, хоча й вимагають спеціалізованих знань для інтерпретації (<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/what-is-earthdata/water-quality-data>); European Environment Agency (EEA) Water Data - надає інформацію про стан водних ресурсів у Європі, зокрема про стан річок, озер та ґрунтових вод. Їхня база даних дозволяє переглядати показники якості води в різних європейських країнах (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/#c2=water>); в Україні працює Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України від Державного агентства водних ресурсів (<http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index>)

– якість ґрунтів можна дослідити за платформами агромоніторинга які працюють за принципом: збір даних – аналіз – візуалізація – рекомендації. До міжнародних платформ належать EOSDA Crop Monitoring, Planet Labs, The Climate Corporation, Trimble Ag Software. До українських платформ відносяться: AgriLab, AgroMonitor, Tocal AMS, Agro-ID.

– основними метеопорталами для України та Східної Європи є Gismeteo, Meteoproг, Sinoptik.ua, інструментами для аналізу клімата та погодних процесів – Ventusky та Windy;

– українська платформа SaveEcoBot (<https://www.saveecobot.com>) для моніторингу пожеж та теплових аномалій використовує дані глобального сервіса від NASA (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/>). Також на платформи моніториться якість повітря, що дає більш повну екологічну ситуацію;

– онлайн карти морських течій важливі для розуміння екологічного моніторингу та прогнозування погоди: Ventusky, Windy, NASA Earthdata (<https://www.earthdata.nasa.gov>), Earth Nullschool (<https://earth.nullschool.net>);

– платформи що моніторять землетруси збирають сейсмічні дані з усього світу і надають інформацію про останні землетруси, їхню силу (магнітуду) та розташування: European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC <https://www.emsc-csem.org>), United States Geological Survey (USGS <https://www.usgs.gov>), VolcanoDiscovery (<https://www.volcanodiscovery.com>), ГЦСК (<https://gcsk.gov.ua>) – офіційний український державний орган, що здійснює моніторинг сейсмічної ситуації в Україні, Earthquake Track (<https://earthquaketrack.com>);

– моніторинг біорізноманіття та природних ресурсів: Global Biodiversity Information Facility (GBIF – <https://www.gbif.org>). Це міжнародна мережа, яка надає вільний доступ до величезної бази даних про види рослин і тварин.; Global Forest Watch (GFW <https://www.globalforestwatch.org>). Ця платформа використовує супутникові дані для моніторингу лісів у реальному часі. GFW дозволяє відстежувати вирубку лісів, виявляти лісові пожежі та аналізувати динаміку змін лісового покриття; Український центр моніторингу біорізноманіття [3]. Це наукова установа, яка збирає та систематизує дані про стан екосистем в Україні. Хоча їхня інформація може бути не на інтерактивній карті, вона доступна у вигляді звітів та наукових публікацій, що є цінним джерелом для досліджень;

– моніторинг радіаційного фону Агенція з ядерної енергії (NEA <https://www.oecd-nea.org>) та Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ <https://www.iaea.org>) та інші організації надають доступ до даних про радіаційну обстановку у світі. Їхні звіти та бази даних є основним джерелом для глобального аналізу; Моніторингові мережі в Європі (EURDEP <https://remon.jrc.ec.europa.eu>). Європейська платформа об'єднує дані моніторингу радіації з різних країн, що дозволяє відстежувати зміни фону по всій Європі; Державна інспекція ядерного регулювання України (ДІЯРУ [251](https://ua-</p></div><div data-bbox=)

energy.org). Це офіційний орган, який контролює безпеку ядерних установок. На їхньому сайті публікується інформація про радіаційний фон в Україні та SaveEcoBot.;

- моніторинг міського середовища та шуму: OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>), додатки для телефонів, зокрема, NoiseMap та SoundMeter. В Україні великі міста створюють власні інтерактивні мапи, також існують громадські ініціативи, наприклад «Мапа сміттєзвалищ України», яка збирає інформацію від громадян про несанкціоновані сміттєзвалища, що є важливим елементом громадського моніторингу.

- комплексні ГІС-платформи та супутникові дані: Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>): потужна хмарна платформа для аналізу супутникових даних та моніторингу екологічних змін та Sentinel Hub – сервіс, що надає доступ до супутникових даних для швидкого моніторингу та аналізу.

Програмне забезпечення для обробки та аналізу даних моніторингу є критично важливим для практичного навчання, адже воно дозволяє студентам перетворити сирі дані на осмислені висновки та візуалізації. Дослідження навколишнього середовища потребує інструментів, здатних опрацьовувати геопросторову інформацію, статистичні ряди та великі масиви даних [4-6]:

- вільне та відкрите програмне забезпечення (FOSS) має особливу цінність для студентів, оскільки воно не вимагає фінансових витрат. Це забезпечує рівний доступ до потужних інструментів для кожного, незалежно від фінансового стану. FOSS-рішення активно розвиваються спільнотою, що забезпечує їхню актуальність та адаптацію до нових викликів [7, 8];

- QGIS – це потужна геоінформаційна система, що є повноцінною альтернативою комерційним аналогам. Вона дозволяє працювати з різноманітними форматами даних, створювати детальні карти, виконувати просторовий аналіз та моделювання. З його допомогою студенти можуть візуалізувати дані моніторингу річкових басейнів, оцінювати поширення забруднюючих речовин та аналізувати зміни в лісовому покриві [9];

- RStudio та мова програмування R дозволяє аналізувати часові ряди даних моніторингу (наприклад, динаміку якості повітря), виявляти кореляції та будувати прогнози. R особливо корисний для роботи з великими табличними даними [10];

- Python – універсальна мова програмування, що завдяки бібліотекам Pandas, NumPy та Matplotlib є чудовим інструментом для обробки та візуалізації даних. Його

можна використовувати для автоматизації збору даних з вебсайтів, інтеграції з ГІС-системами та створення складних моделей аналізу [11, 12].

Таким чином, впровадження онлайн-ресурсів та відкритого програмного забезпечення у навчальний процес з екологічного моніторингу не лише розширює доступ студентів до актуальної інформації, а й формує в них критичне мислення, аналітичні навички та здатність працювати з великими масивами даних. Вільний доступ до потужних інструментів усуває фінансові бар'єри й дозволяє кожному навчатись і досліджувати в умовах, максимально наближених до реальних. Поєднання глобальних систем спостереження з локальними ініціативами та цифровими інструментами відкриває нові можливості для підготовки висококваліфікованих фахівців, здатних ефективно реагувати на сучасні екологічні виклики.

Література

1. Wiersma, G. B. (Ed.). (2004). Environmental monitoring. CRC Press. 792 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9780203495476>
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-XII. Відомості Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
3. Різун В., Глотов В., Гуштан Г. Г., Яницький Т. та ін. Використання інформаційного ресурсу Центр даних «Біорізноманіття України» для моніторингу біоти // Моніторинг та охорона біорізноманіття в Україні. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». — 2020. — Вип. 16, Т. 3. — С. 111–119.
4. Zhang, Z. Environmental Data Analysis: Methods and Applications. De Gruyter, 2017. <https://www.doi.org/10.1515/9783110424904>
5. Menke, W., Menke, J. Environmental Data Analysis with MATLAB. Academic Press, 2016. <https://www.doi.org/10.1016/C2015-0-01993-1>
6. Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., Metz, M. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. Environmental Modelling & Software, 2012, Vol. 31, pp. 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.014>
7. Nayak, K.; Binjha, P. B. Student's Awareness of Free and Open-Source Software (FOSS) in Higher Education. *Asian Journal of Education and Social Studies*, 2022, Vol. 26, Iss. 2, p. 81–87. <https://doi.org/10.9734/ajess/2022/v26i230625> journalajess.com

8. Petras, V.; Petrasova, A.; Harmon, B.; Meentemeyer, R.; Mitasova, H. Integrating Free and Open-Source Solutions into Geospatial Science Education. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, Vol. 4, Iss. 2, p. 942–956. <https://doi.org/10.3390/ijgi4020942>
9. Величко, С., Дупляк, О. Використання програмного комплексу QGIS для визначення гідрологічних характеристик: досвід використання в навчальному процесі. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2024, № 47, с. 4–11. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.47.4-11>
10. Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N., Saveliev, A.A. and Smith, G.M. (2009) *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer, New York, 574. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>
11. Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. Array programming with NumPy. *Nature*, 2020, Vol. 585, pp. 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
12. Hunter, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 2007, Vol. 9(3), pp. 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

Забара І. І.

Комунальне підприємство «Міськводоканал» Сумської міської ради, м. Суми, Україна

БІОЦЕНОЗ АКТИВНОГО МУЛУ В АЕРОТЕНКАХ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ОЧИСНИХ СПОРУД м. СУМИ

В активному мулі очисних споруд м. Суми (далі КОС) досліджувались відмінності видового складу та співвідношення основних індикаторних груп мікроорганізмів активного мулу. Досліджено біоценоз аеротенків – витискувачів з регенерацією активного мулу. Ідентифіковано 80 видів мікроорганізмів, що дозволило створити електронну базу даних активного мулу на міських очисних спорудах.

На теперішній час обробку стічних вод на каналізаційних очисних спорудах міст України переважно здійснюють за класичною технологією, що включає механічне очищення на решітках, потім піскоуловлювачах і первинних відстійниках. Біологічну обробку проводять в аеротенках з подальшим вторинним відстоюванням, також можлива доочистка стічної води різними способами.

Основною спорудою, де відбувається деградація органічних і неорганічних забруднень стічних вод, є аеротенк. Залежно від технологічних умов в аеротенках розвивається характерний для даної очисної споруди біоценоз активного мулу. Розвиток біоценозу відбувається послідовно через ряд проміжних стадій, що відрізняються якісним і кількісним складом представників різних груп організмів [1].

Гідробіонти активного мулу, що здійснюють біологічне очищення в аеротенках, представлені змішаною популяцією мікроорганізмів, яка формується шляхом селекції мікроорганізмів стічної води. Мікроорганізми активного мулу в кожному окремому випадку утворюються відповідно до складу і концентрації стічного потоку в умовах аеротенка.

Активний мул, що очищає висококонцентровану стічну воду, складається з дрібних, легких пластівців, утворених шляхом злипання оболонок бактерій. Зі зниженням концентрації стоку пластівці мулу збільшуються в розмірах. Кращими вважаються пластівці середнього розміру, які швидше адсорбують забруднення. Таким чином, основу активного мулу складають бактеріальні пластівці, що представляють складний біоценоз, до складу якого входять різні систематичні групи.

Оцінка кількісного і якісного складу біоценозу активного мулу дає можливість досить швидко виявити порушення біологічної очистки стічних вод. Погіршення умов навколишнього середовища призводить до зміни фізіологічного стану гідробіонтів, які фіксуються мікроскопуванням проби активного мулу. Таким чином, інженери-гідробіологи очисних споруд можуть значно покращити якість біологічної очистки, а також запобігти жакливим наслідкам для екології регіону.

Умови дослідження біоценозу активного мулу КОС.

Всі дослідження здійснювали на місцевому матеріалі (стічна вода та активний мул) в лабораторії КОС м. Суми.

Для мікроскопічного дослідження зразків активного мулу використовували біологічний мікроскоп типу BIOREX-3 KONUS 5605 та біологічний мікроскоп типу MOTIC BA310E, які оснащені: трьома окулярними тубусами; змінним освітленням; здатні проводити фазово - контрастні спостереження; мають по 4 об'єктиви (5×, 10×, 40×, 100×) та цифрову 5-мегапксельну камеру з програмним забезпеченням і підключенням до комп'ютера.

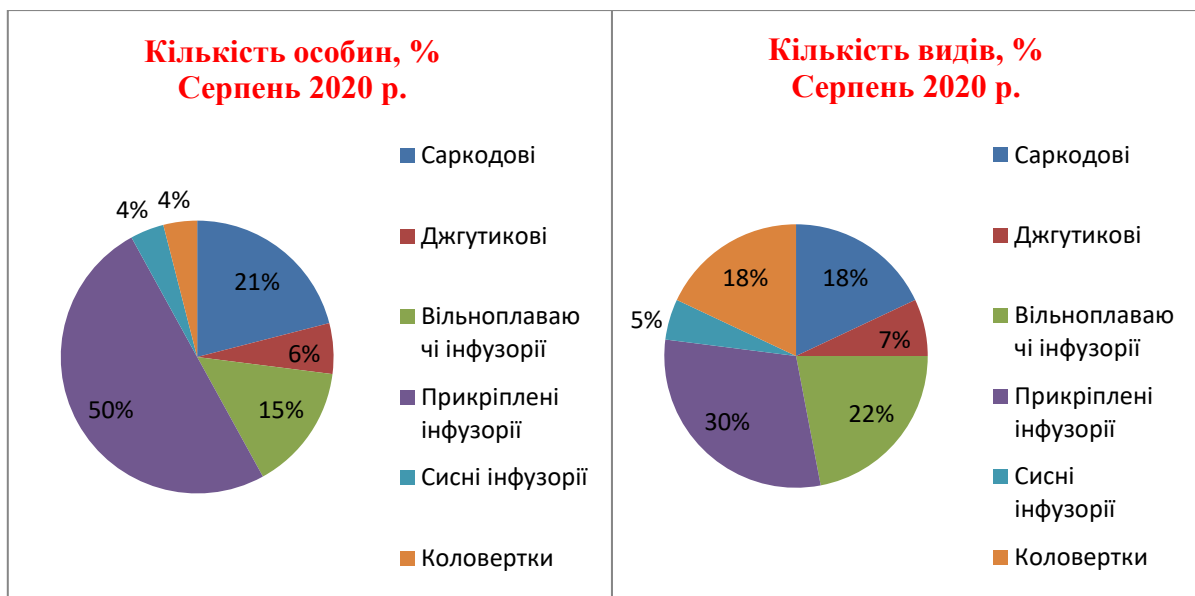
За допомогою регулярних та систематичних мікроскопічних досліджень можливо відстеження зміни біоценозу активного мулу. Для якісного спостереження аналізували щонайменше 3 зразки активного мулу та обчислювали середнє значення результатів за допомогою камери Горяєва. За допомогою мікроскопування фіксували структуру та розмір флокул, рахували кількість особин та видів домінуючих мікроорганізмів, визначали стан організмів (рухомість та деформацію організмів, особливості поведінки, забарвлення, наявність харчових вакуолей, утворення колоній і агрегатів, фази розмноження). Порівняння проводилося окремо для всіх основних категорій видів індикаторних мікроорганізмів АМ. Розраховували кількість організмів в 1 мл мулової суміші. Визначали також сумарну кількість мікроорганізмів, що належать до основних індикаторних груп. Ідентифікацію організмів здійснювали за морфологічними ознаками відповідно до наукових джерел [3–6].

Результати дослідження біоценозу активного мулу КОС.

Лабораторією КОС м. Суми постійно проводяться гідробіологічні дослідження активного мулу, які дозволяють робити оцінку біоценозу активного мулу та створювати заходи для покращення його стану. Одним з таких заходів є застосування способу біологічної активації мулу клітинними метаболітами з метою оздоровлення та покращення різноманіття біомаси на КОС м. Суми.

Після використання протягом року біологічної активації у складі біоценозу аеротенків КОС м. Суми були виявлені представники всіх відомих індикаторних груп мікроорганізмів. Найбільша різноманітність видів гідробіонтів активного мулу зафіксовано на КОС у серпні-жовтні місяці. За результатами мікроскопічних досліджень у серпні 2020 року було ідентифіковано: 32 представники різних видів гідробіонтів активного мулу, в тому числі: 2 види джгутикових; 4 види раковинних амеб і 1 вид голих амеб; 10 видів рівновійкових, вільноплаваючих, черевовійкових; 5 видів сисних інфузорій; 10 видів прикріплених інфузорій; 10 видів коловерток; 1 вид черв'я та 1 вид тихоходки (діаграма 1).

У видовому складі активного мулу присутні 21% саркодових (раковинні та голі амеби), досить велику частку - 30% складають прикріплені інфузорії, а наявність сисних інфузорій та коловерток свідчить про високий рівень розвитку біоценозу активного мулу



Діаграма 1 – Співвідношення основних індикаторних груп мікроорганізмів активного мулу у серпні 2020 р.

Під час воєнного стану масовані удари по енергосистемі призводять до знеструмлення очисних споруд і відповідно зупинки компресорної станції, що спричиняє погіршення стану гідробіонтів в аеротенках КОС.

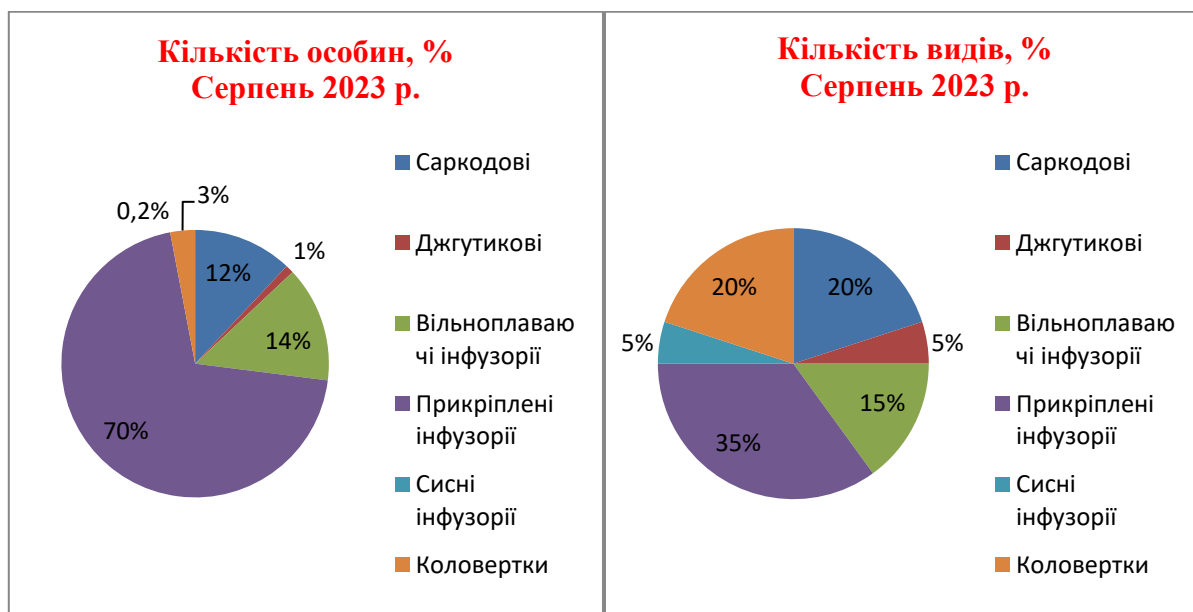
До початку воєнних дій біоценоз активного мулу на КОС налічував 30-40 видів гідробіонтів. У 2022 року кількість різноманіття зменшилась до 17-20 видів гідробіонтів.

Попередній досвід показав, що в результаті використання способу біологічної активації мікроорганізмів активного мулу метаболітами циклу Кребса у біоценозі активного мулу утворюється стійка та адаптована до заданого стоку біота,

покращується спадкова різноманітність біомаси й підвищується ферментативна активність щодо деградації забруднюючих речовин в стічних водах.

За 2022 рік на КОС м. Суми проведено 29 біологічних активацій, за перше півріччя 2023 року проведено 23 біологічні активації. Згідно проведених мікроскопічних досліджень у серпні 2023 року ідентифіковано: 23 представники різних видів гідробіонтів активного мулу, в тому числі: 1 вид джгутикових; 4 види раковинних амеб і 1 вид голих амеб; 3 види рівновійкових, вільноплаваючих, черевовійкових; 1 вид сисних інфузорій; 7 видів прикріплених інфузорій; 4 видів коловерток; 1 вид червів та 1 вид кліщів.

Збільшення кількості видів та особин прикріплених інфузорій свідчить про налагодження системи біологічної очистки в аеротенках, а саме активний мул стає зрілим та стабільним. Прикріплені інфузорії сприяють коагуляції бактерій на флокулах, що поліпшує осідання мулу у вторинних відстійниках, запобігаючи його виносу з системи очищення. Якщо саркодові присутні в помірній кількості з домінуючою популяцією прикріплених інфузорій, це також вказує на ефективне біологічне очищення (діаграма 2).



Діаграма 2 – Співвідношення основних індикаторних груп мікроорганізмів активного мулу у серпні 2023 р.

Збільшення кількості видів та особин коловерток означає, що в системі очищення з'явилася достатня кількість їжі, а саме розвинена популяція інших мікроорганізмів. Формується складний харчовий ланцюг: бактерії – інфузорії – коловертки. Це характерно для активного мулу з тривалим часом перебування. Також

присутність великої кількості коловерток призводить до додаткового освітлення та поліпшення якості води на виході з очисних споруд.

З літературних джерел відомо, що збільшення коловерток, вказує на «старіння» мулу та потребує інтенсифікації видалення надлишкового мулу, щоб омолодити біоценоз. В нашому випадку досягнуто саморегулювання дози активного мулу за допомогою біологічних активацій, що створило умови відсутності надлишкового мулу в системі очистки (аеротенк -вторинний відстійник).

Як наслідок, маємо оптимальне співвідношення мікроорганізмів активного мулу (діаграма 3).



Діаграма 3 – Співвідношення основних індикаторних груп мікроорганізмів активного мулу у серпні 2025 р.

За результатами проведених досліджень протягом 2020-2024 років вдалося ідентифікувати 80 представників різних видів гідробіонтів активного мулу, в тому числі: 4 види джгутикових; 7 видів раковиних амеб і 5 видів голих амеб; 23 види рівновійкових, вільноплаваючих, черевовійкових інфузорій; 12 видів сисних інфузорій; 10 видів прикріплених інфузорій; 14 видів коловерток; 3 види черв'яків; 1 вид кліщів та 1 вид тихоходки.

Висновок

Склад біоценозу активного мулу можна визнати характерним для даних очисних споруд за умови ефективного біологічного процесу очищення в аеротенках і швидкого осідання активного мулу у вторинних відстійниках.

Постійне спостереження за розвитком спільноти гідробіонтів дозволяє виявляти відхилення чисельності та співвідношення організмів основних індикаторних груп від типових для КОС м. Суми.

В результаті виконаної роботи виявлено та ідентифіковано близько 80 видів гідробіонтів активного мулу. Отримані фото- та відеоматеріали використано для створення електронної бази даних «Активний мул».

Застосування створеного електронного ресурсу на практиці розширить можливості управління процесом очищення стічних вод на міських очисних спорудах.

Література

1. Методическое руководство по контролю процесса биологической очистки городских сточных вод: учеб. - метод. пособие для студентов специальности «Биоэкология»/ Р.М. Маркевич [и др.]. – Минск: БГТУБ2009 – 161 с.
2. Фельбер Г., Фішер М. Посібник оператора каналізаційних очисних споруд / спільно зі спеціальним комітетом DWA БІЦ-2 «Базові курси»; -Львів: ПАІС, 2020.-520 с.
3. Фауна аэротенков: атлас / А. А. Айсаев [и др.]; отв. ред. Л. А. Кутикова. – Л.: Наука: Ленинград. отделение, 1984. – 264 с.
4. Кутикова, Л. А. Коловратки фауны СССР / Л. А. Кутикова. – Л.: Наука, 1970. – 744 с.
5. Edyta Fialkowska, Janusz Fyda, Agnieszka Pagdak-Stós, Krzysztof Wiąckowski. «Osad czynny: biologia i analiza mskroskopowa». Kraków, Oficyna Wydawnicza Impuls, 2005.
6. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
7. Edyta Fialkowska, Janusz Fyda, Agnieszka Pagdak-Stós, Krzysztof Wiąckowski. «Osad czynny: biologia i analiza mskroskopowa». Kraków, Oficyna Wydawnicza Impuls, 2005.
8. Забара І.І. Саморегуляція активного мулу// Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: збірник наук. статей XVIII Міжнародної науково-практичн. конференції (м. Харків, 15-16 вересня 2022 р.) / УКРНДІЕП., 2022. – 396 с.
9. Спосіб біологічної активації мікроорганізмів активного мулу (удосконалення). Патент на корисну модель України №153846 від 06.09.2023р.

Зінченко І. В.,

Густавсон І. А., канд. техн. наук

Кононенко К. С.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ПІНОВИНИКНЕННЯ У СТІЧНИХ ВОДАХ ШКІРЯНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЗАСОБІВ ЗАПОБІГАННЯ

Чиста вода – залог здоров'я населення, охорони довкілля, ефективного виробництва. Забруднення поверхневих вод – це велика проблема і невідкладне завдання, що потребує уваги. Антропогенне забруднення водою відбувається, в основному, з різних точкових джерел скиду стічних вод, які недостатньо очищені або неочищені взагалі та розосереджених джерел, які мають безліч шляхів забруднення (з сільськогосподарчих угідь, поверхневі стоки з урбанізованих територій, інфільтрати, атмосферні опади тощо). Очисні споруди, часто не можуть справитися з великим навантаженням по забруднюючих речовин, які поступають з виробничими стічними водами. Підприємства, які мають складні технологічні процеси, в результаті яких утворюються висококонцентровані стічні води, що містять важко розкладні або токсичні сполуки, можуть викликати проблему для очисних споруд, порушувати регламент очищення і знижати якість очищеної води.

Так, наприклад, стічні води, які утворювалися на підприємстві з виробництва шкіри, і потрапляли на міські очисні споруди викликали утворення стійкої темної щільної піни в аеротенках, сприяло зменшенню кількості активного мулу, його різноманіттю і значно знижало ефективність очистки.

Метою нашої роботи було встановити причину утворення піни і рекомендувати методи її знешкодження.

Під час досліджень були проведені вимірювання складу стічних вод, що утворювалися у технологічних процесах, визначений склад піни, її токсичність відносно мікроорганізмів активного мулу і проведені експериментальні дослідження щодо запобігання піноутворення.

У таблиці 1 надані параметри виробничих стічних вод за фізико-хімічними показниками.

Таблиця 1 – Параметри стічних вод, що утворюються на заводі виробництва шкір м²/дм.куб

Параметри виробничих стічних вод												
рН, од рН	Завислі речовини	ХХСК	БСК ₅	СПАР	Ортофосфати	Азот амонійний	Нітри	Нітрати	Хлориди	Залізо загальне	Сульфати	Етеророзчинені
7,8	1713	1100	390	6,88	12,4	182,0	1,8	8,6	1850	1,4	320	222,5

За даними таблиці видно, що стічні води, які утворювалися на шкіряному заводі мали великі значення інтегрального показника органічних забруднюючих речовин – ХСК при одночасному не великому значенні БСК-5 – показника біохімічного окиснення стоку. Співвідношення між цими показниками свідчить про те, що виробничі стічні води мають склад, який ускладнював біологічне очищення. Звертає уваги великі концентрації фосфатів, хлоридів і амонійного азоту і, особливо, етеророзчинених речовин (жирів). Джерелом великих концентрацій фосфатів були СПАР, амонійного азоту – продукти окиснення білків, хлориди і етеророзчинені речовини – домішки у технологічних процесах.

На поверхні аеротенків і вторинного відстійника спостерігалася щільна піна коричневого кольору.

Для визначення можливої шкідливої дії піни щодо активного мулу БОС були проведені тести на її токсичність. Для дослідження були відібрані зразки піни з зони аерації аеротенку («свіжа піна») і з краю споруди – зони без аерації («стара» піна). Обидва зразка тестували щодо токсичності відносно тестового об'єкту – кишкової палички (*Escherichia coli*) – яка завжди присутня в стічних водах і активному мулі. Оцінювання токсичності проводили за біохімічним методом шляхом визначення ферментативної активності дегідрогеназного комплексу (ДГА) *Escherichia coli*. Шляхом порівняння ДГА тест-об'єкта, що знаходився в оптимальних умовах існування, з ДГА тест-об'єкту після контакту із зразками піни оцінювали можливі токсичні властивості піни. У результаті експерименту було встановлено, що обидва зразка піни під час контактування з мікроорганізмами тест-об'єкту не проявили токсичної дії відносно бактерій.

Для визначення природи походження піни її аналізували методом інфрачервоної спектроскопії (ІЧ). ІЧ показала наявність великої кількості аліфатичних вуглеводнів, а також силіконових полімерів, складних ефірних сполук, білків,

полісахаридів, іонів Ca^{+2} , Cr^{+3} , Fe заг., Cl^- . За відсотковим вмістом неорганічних сполук більш всього спостерігалось іонів Ca^{+2} .

Додатково піна була проаналізована на вміст етеророзчинених речовин (жирів) у порівнянні зі складом активного мулу міських біологічних очисних споруд (БОС), куди поступала стічна вода зі шкіряного заводу і активного мула БОС м. Харків.

Таблиця 2 – Вміст етеророзчинених речовин (жирів) у піні та активному мулі

Показник	Об'єкт, що досліджувався		
	Піна з аеротенку	Активний мул (міські БОС)	Активний мул (БОС м. Харків)
Етеророзчинені речовини (жири), мг/г сухої речовини	125,0	1,42	0,44

За даними таблиці 2 видно, що в 1 г сухої речовини піни міститься 125 мг жирів; а у складі активного мулу міських БОС, куди відводяться стоки заводу, вміст жирів у 3 рази більше, ніж в активному мулі БОС м. Харків.

В технологічних процесах оброблення шкіри використовують велику кількість хімічних речовин, у тому числі, гідрофобних органічних сполук, складних жироподібних речовин, які не окислюються біологічним способом і можуть негативно впливати на активний мул. Проте в умовах нестачі кисню може траплятися їхня деградація.

Мікроскопічні дослідження активного мулу БОС показали наявність досить великої кількості нитчастих форм мікроорганізмів.

Надмірний розвиток нитчастих форм в активному мулі призводить до зменшення обсягу надосадової рідини, виносу мулових часток разом з очищеною водою і зниження концентрації активного мулу в рециркуляційному потоці.

Надходження на КОС стічних вод, які містять великі концентрації жирів і жироподібних речовин і сульфідів може сприяти розвитку *філаментних мікроорганізмів*, таких як *нокардії (Nocardia spp.)*, *мікрококкус (Mikrococcus spp.)*, *родококки (Rodococcus ssp.)*, які знаходяться в складі активного мулу, але у разі сприятливих для них умов починають інтенсивно розвиватися. При цьому клітини можуть бути, як ниткоподібні, так й у вигляді окремих клітин. Бактерій мають гідрофобну поверхню, що і призводить до їх спливання разом з частинками активного мулу. Також бактерії можуть виділяти поверхнево-активні речовини, що сприяє процесу піноутворення. Жироподібні речовини сорбуються на хлопки активного мулу і

можуть надавати щільні, «важки» властивості піни. Забарвлення піни – темно-коричнева.

Піноутворення в аеротенках можуть викликати:

– наявність в стічній воді білків, які при взаємодії з киснем повітря і полімерами клітинної оболонки мікроорганізмів може викликати появу піни;

– деградація ліпідів і вищих жирних кислот в анаеробних умовах первинного відстійника є джерелом вуглецю для таких видів мікроорганізмів, як *Nocardia* spp. і *Mikrococcus* spp.;

– наявність поверхнево-активних полімерів в стічній воді.

Всі ці фактори присутні в стічних водах виробництва шкіри.

Для запобігання утворення піни на БОС були проведення експериментальні дослідження в лабораторних умовах з очистки стічних вод шкіряного заводу, які поступають на БОС.

Стічну воду з аеротенку заводу оброблювали адсорбційним методом за допомогою активованого вугілля і рідкого пентану (H-C_5). Досліджували наступні варіанти:

- № 1 – адсорбційна очистка. Стічну воду змішували в турбулентному режимі впродовж 5 хвилин з порошкоподібним активованим вугіллем (СКТ-6) доданим в кількості 5 % мас. після чого основну масу адсорбента видаляли фільтруванням під розрідженням;
- № 2 – двох ступенева екстракційна очистка. Стічну воду змішували в турбулентному режимі впродовж 5 хвилин з рідким пентаном, після чого давали рідинам розділитися методом відстоювання впродовж 60 хвилин. Потім водну фазу зливали і знову її обробляли рідким пентаном. Після відстоювання очищену воду відділяли від вуглеводневого шару за допомогою ділильної лійки. Загальний обсяг використаного пентану складав 10 %;
- № 3 – поєднане послідовного екстракційного і адсорбційного очищення. Стічну воду спочатку обробляли рідким пентаном (5 % мас.), а потім (після відділення вуглеводневого шару) її пропускали через гранульоване активоване вугілля (СКТ-6).

Пробу, оброблену за варіантом № 1, освітили шляхом видалення залишків вугільної фракції за методом центрифугування. Після фільтрування стічна вода з наступним висвітленням стала досить прозорою. Оброблення стічної води методом екстракції рідким пентаном на гранульованому активованому вугіллі також зменшило мутність води. Результати хімічних аналізів води, обробленої різними методами надані в таблиці 3.

Таблиця 3 – Параметри стічної води з заводу, обробленої сорбційними методами

Показник	Стічна вода, що утворювалась на заводі	Варіант методу очищення		
		Варіант № 1 (фільтрація через порошок активованого вугілля після освітлення)	Варіант № 2 (2-х ступенева екстракція)	Варіант № 3 (1-не ступенева екстракція пентаном)
рН, од рН	7,8	8,2	7,9	8,7
ХСК, мг/дм ³	890	510	720	412
АСПАР, мг/дм ³	0,88	< 0,01	-	< 0,01
Жири, мг/дм ³	222	5,8	6,2	4,6
Завислі речовини, мг/дм ³	1713	18	1300	68

З даних таблиці 3 видно, що ХСК знизилось у варіанті № 1 на 40%, у варіанті № 3 – на 54%. Двоступеневе оброблення води (варіант 2) не вплинуло на інтегральний показник забруднення.

Встановлено, що найбільш ефективними методами доочищення стічної води є фільтрація через порошок активованого вугілля дрібної фракції (СКТ-6) з подальшим освітленням (у даному випадку, шляхом центрифугування) і одне ступенева екстракція пентаном. Таким чином, зроблено висновок, що у разі додаткового оброблення стічної води, яка надходить після локальних очисних споруд заводу, можна позбутися домішок, які викликають утворення стійкої чорної піни. Наприклад, застосовуючи метод адсорбції з активованим вугіллем і поєднаним послідовним екстракційно-адсорбційним очищенням. Подальше, доочищену таким чином виробничу стічну воду аерували з активним мулом БОС і паралельно аерували необроблену виробничу стічну воду з тем же мулом. В результаті спостерігали утворення великої кількості щільної піни у варіанті барбатажу необробленої води і майже відсутність піни у варіантах барбатажу активного мулу з доочищеною водою. При цьому, піна була світла і «легка».

Висновки

Визначено, що утворення піни на поверхні розділу рідка фази/повітря – це складний багатофазовий фізико-хімічний процес, який має одночасно декілька причин. У формуванні піни пріоритетна роль належить структурам активного мулу, поверхнево-активним речовинам, жироподібним речовинам та їх концентраціям в стічних водах, а також параметрам очищення. Експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах встановлено, що оброблення стічної води заводу з виробництва шкір методом адсорбції з активованим вугіллям в поєднанні з послідовним екстракційно-адсорбційним очищенням сприяє ефективному зниженню забруднюючих речовин в стоці і значно зменшує утворення піни.

Ivashura A. A., PhD in Agricultural Sciences, Assistant Professor
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS OF CONTEMPORARY SOLUTIONS FOR MINIMIZING PLASTIC POLLUTION DURING 2020–2025 AND IDENTIFICATION OF FUTURE RESEARCH DIRECTIONS

In recent decades, plastic materials have transformed global production, trade, and consumption systems. Their lightness, durability, and low cost have driven exponential growth, with more than 75% of all plastics produced worldwide remaining unrecycled and either landfilled or entering the environment [1]. The period from 2020 to 2025 has become a critical turning point in recognizing the need to adopt modern solutions to minimize plastic pollution. The role of plastics in economies and ecosystems is being redefined, and a new politico-environmental paradigm is emerging, grounded in international agreements, the circular economy, and science-based decision-making.

The universalization of the environmental threat posed by plastic pollution has led to the institutionalization of a global political response. Resolution 5/14, adopted in 2022 during the fifth session of the United Nations Environment Assembly (UNEA), marked the beginning of negotiations on establishing a comprehensive, legally binding plastic treaty. This decision represents a shift from fragmented regulation to managing the full life cycle of polymers, including raw material extraction, production, consumption, disposal, and transboundary waste trade [2].

Developed countries, particularly the European Union, had already established institutional frameworks for managing plastic flows by that time. The Single-Use Plastics Directive (SUPD), which came into force in 2021, became a cornerstone of the EU's policy to reduce marine litter. Combined with the broader Circular Economy Action Plan (CEAP) and strategies aimed at promoting reuse and recycling, these measures are designed not only to achieve environmental objectives but also to foster the development of a new industrial paradigm.

Outside the EU, national programs have adapted at varying speeds and depths. Canada implemented a complete ban on six key categories of single-use plastics starting in 2022, while India restricted the production and import of non-recyclable plastic products

beginning in 2021. However, differences in resources, institutional readiness, and consumer behavior make the universal implementation of such measures a challenging task.

Despite the rapid development of plastic policies between 2020 and 2025, the effectiveness of the implemented measures remains limited. The primary reason lies in the profound mismatch between the declarative nature of political initiatives and the real conditions of their implementation. This inconsistency manifests both in legislative gaps and in the shortcomings of managerial and institutional mechanisms. As a result, despite the introduction of directives, strategies, and agreements, most countries have failed to achieve a systemic reduction in the plastic burden on the environment.

Firstly, a significant portion of the existing regulations addresses only the most visible aspects of the problem—primarily single-use plastic items such as bags, straws, cutlery, and packaging. However, this approach targets only a limited segment of overall plastic production. It fails to address the issue of secondary microplastics generated during the wear and tear of synthetic textiles, automobile tires, paint coatings, and other sources that fall outside the scope of current legal frameworks. Regulatory acts generally do not incorporate a comprehensive life-cycle analysis of plastics, which leads to the neglect of the most significant sources of pollution.

Secondly, at the global level, there is no universal legal framework that would oblige states to adhere to common standards for plastic management. The UNEA Resolution 5/14 initiated a negotiation process to establish an international plastic treaty; however, as of 2025, this agreement has not yet entered into force. This situation leads to an asymmetry of efforts: developed countries, which have the resources to implement strict regulations, are gradually adopting measures to transition toward a circular economy, while countries of the Global South remain vulnerable. They often become the final destinations for plastic waste re-exported from countries with stricter restrictions.

The third challenge lies in the weak institutional capacity at the level of executive bodies. Even in countries where laws restricting or banning certain types of plastic have been formally adopted, there is often a lack of adequate mechanisms for monitoring, enforcement, and accountability for violations. Examples from Southeast Asia, Latin America, and Eastern Europe demonstrate that such laws are frequently not supported by comprehensive systems of inspections, penalties, reporting, and standardized data on plastic flows [3]. In practice, this often results in partial or merely formal implementation (Table 1).

Conclusions from the table:

- The EU demonstrates the highest level of regulatory maturity and an integrated approach to addressing the issue of plastic waste, with a focus on the life cycle, digitalization, and regional support.

Table 1 – Comparative Table: Regulatory Barriers and Gaps in Plastic Waste Management

Parameter	EU	US	Ukraine
Single-use Plastics Strategy	Full ban on major SUPs since 2021 (Directive (EU) 2019/904)	Absent at the federal level; only in certain states.	Planned adaptation of the SUP Directive within the framework of the EU Association Agreement.
National Circular Economy Strategy	EU-wide, updated within the framework of the Green Deal (CEAP 2020)	No comprehensive strategy.	The first concepts are not institutionalized at the government level.
Microplastics Regulation	The European Chemicals Agency (ECHA) is preparing additional restrictions	Limited to voluntary standards (e.g., cosmetics).	No regulatory definition of microplastics.
Extended Producer Responsibility (EPR) System	Mandatory for packaging, electronics, tires, and other sectors	Voluntary, partially regulated by the EPA.	Introduced in 2023 for packaging, but with a low level of implementation.
Bioplastics Labeling	Unified European standards EN 13432 have been introduced	No mandatory requirements.	No unified criteria.
Control of Plastic Waste Export/Import	Export ban to non-OECD countries (in accordance with the Basel Convention)	Partial control with many loopholes.	Export-import is almost unregulated.
Coverage of Rural Areas by Policy Measures	A high level of coverage and financing is provided through EU funds.	Uneven: regulation mainly in urban areas.	Lack of coverage in rural areas and small towns.
Plastic Flow Accounting Platforms	A unified digital portal (EU Waste Tracking) is under development	Decentralized, mostly for industrial waste.	No national platforms.
Science-Policy Integration	A high effectiveness supported by funding from Horizon Europe and the Joint Research Centre (JRC)	Weak integration of science into policy.	Fragmented; research does not directly influence policy.

- The United States operates in a fragmented manner, with inconsistencies at the federal level, but has high development potential due to its strong scientific base and private sector.

- Ukraine is at the stage of legislative transformation under the influence of European integration commitments, but currently lacks a systematic implementation of key instruments.

An additional aspect of regulatory inconsistency lies in the technical and methodological fragmentation regarding labeling, standardization, and classification of plastics. The absence of harmonized definitions for “biodegradable” or “compostable” plastics complicates both their proper application and their monitoring. Companies frequently employ marketing terms without sufficient scientific evidence, which leads to “greenwashing” and undermines consumer trust in environmental initiatives.

The problem is further exacerbated by the insufficient consideration of economic incentives and behavioral mechanisms. In many countries, plastic remains economically advantageous for both producers and consumers since real environmental costs are not incorporated into the market price. Tax measures or subsidies for alternative materials are either absent or remain in their early stages of development. As a result, the adoption of sustainable alternatives is progressing extremely slowly.

Finally, there is a noticeable gap between academic knowledge and policy practice. While research in microplastic toxicology, circular economy, life cycle assessment (LCA), and behavioral economics demonstrates the complex and multidimensional nature of the issue, most regulatory initiatives are limited to narrowly focused measures. Scientific evidence is often not fully integrated into the decision-making process, and policymaking rarely involves comprehensive risk assessments, evaluations of environmental and economic scenarios, or predictive modeling.

Thus, at the current stage, the fight against plastic pollution remains largely declarative, particularly in countries with limited resources and weak governance infrastructure. Transitioning to an effective system of sustainable plastic management requires not merely revising certain legislative provisions but implementing a profound institutional reform. This reform must be grounded in science, transparency, and international coordination while also taking into account cultural, economic, and technological differences between countries and regions.

There is a significant lack of scientific support for decision-making. Life cycle assessment (LCA) strategies, when compared with alternative materials such as PLA, PHA, or cellulose composites, provide ambiguous results. Meta-analyses indicate that bioplastics can outperform conventional plastics in terms of greenhouse gas emissions and freshwater

consumption, particularly at the stages of raw material cultivation and composting under unsuitable conditions.

The toxicology of microplastics and nanoplastics remains the least studied area. Experimental data show bioaccumulation of particles in the lung, liver, and lymphatic tissues; however, the mechanisms affecting genetic expression and endocrine regulation remain unknown. Some studies suggest a possible association between inhalation of microplastics and chronic inflammatory diseases, yet causative links have not been confirmed.

An equally important area remains the behavioral and cultural barriers to transitioning toward a plastic-free economy. Consumers in most countries show limited responsiveness to initiatives aimed at reducing single-use packaging, even when they are aware of the environmental risks. This necessitates the implementation of new models of social governance — from green nudging to the introduction of deposit-return systems.

A key challenge for the next stage is transforming the fragmented regulatory environment into a synchronized multi-level mechanism. This includes developing a global agreement with a unified reporting standard, as well as supporting countries with low institutional readiness through “plastic transition justice” mechanisms. Particular attention should be given to the informal sector, which accounts for up to 60% of recycling in Global South countries but remains excluded from formal policymaking processes.

Simultaneously, a transition from product bans to systemic economic transformation is necessary. This can be achieved through the creation of “green ecosystems” for recycling, subsidies for innovative materials, and the digitalization of plastic flows, utilizing artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and blockchain technologies for tracking, assessing, and optimizing the life cycle.

The period from 2020 to 2025 represents a critical stage in shaping a new environmental and managerial paradigm to combat plastic pollution. The adoption of several precedent-setting policy decisions at the global level, including the launch of negotiations on a legally binding international agreement, demonstrates growing global awareness of the issue. At the same time, there are significant discrepancies in the effectiveness of policy measures at the regional and national levels, highlighting the need for deeper coordination and the universalization of approaches to plastic life cycle management.

Despite the significant expansion of legal frameworks and the introduction of circular economy principles, a persistent gap remains between declared objectives and actual environmental outcomes. This gap is driven by a complex set of factors, with key issues including institutional constraints, fragmented inter-agency coordination, insufficient

integration of scientific data into policymaking processes, and sociocultural barriers that slow down changes in consumption patterns. A critical problem lies in the fact that national strategies are predominantly focused on regulating a limited range of plastic products, while issues such as microplastics, illegal waste trade, bioplastic management, and innovative alternative materials remain largely outside a comprehensive political agenda.

Furthermore, many countries lack effective mechanisms for monitoring and evaluating the impact of implemented environmental policies, resulting in limited transparency and low accountability of responsible authorities. An additional contributor to this gap is the insufficient level of business incentives to transition toward environmentally sustainable production models, including systems of reuse, packaging reduction, and the adoption of biodegradable materials. Sociocultural factors, such as low public awareness of environmental issues, weak motivation to sort waste, and limited access to recycling infrastructure, further exacerbate the problem.

As a result, even in the presence of large-scale regulatory initiatives, the actual environmental impact remains limited. To bridge this gap, it is essential to implement integrated approaches that combine scientific research, innovative technologies, economic incentives, and educational programs for society. Only the systemic alignment of environmental, economic, and social policies can ensure the effective implementation of circular economy principles and the achievement of established environmental pollution reduction goals.

A key condition for success is the ability to build long-term political will aimed not at temporary bans but at institutional and cultural transformations. In particular, this involves the need to transform the entire production–consumption logic toward systemic sustainability — from packaging and material design to shaping a culture of waste management. Effective strategies cannot be imposed externally; they must be developed with consideration of the national context while remaining aligned with international commitments and scientific standards.

Thus, the fight against plastic pollution becomes an indicator of the maturity of environmental governance and the capacity of states and companies to build future development scenarios based on the principles of sustainability.

References

1. Івашура А. А. Аналіз впровадження практик сталого споживання в Україні на основі зарубіжного досвіду / А. А. Івашура, О. М. Борисенко // Grail of Science. – 2023. – № 25. – С. 183-189.

2. Івашура А. А. Аналіз сталого споживання і виробництва в Україні / А. А. Івашура, О. М. Борисенко, М. Ф. Савченко та ін. // Technological innovation: engineering, manufacturing, agricultural complex and zoology : Collective Scientific Monograph. – Dallas, USA: Primedia eLaunch LLC, 2022. – P. 60-68.
3. Yang J. The Mapping of Global Plastic Pollution Research: A Bibliometric Analysis of the Progress and Thematic Trends. / J. Yang, X. Hu, F.Tan // Sustainability. – 2025. – №17(5). – C.1859.

Ivashura A. A., PhD in Agricultural Sciences, Assistant Professor
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

REGIONAL ENVIRONMENTAL CHALLENGES AND PRIORITIES FOR SUSTAINABLE RECOVERY IN UKRAINE

The period of 2022–2025 has become a time of profound trials for Ukraine. The war has not only destroyed cities and infrastructure but also created unprecedented environmental risks that will determine the country's resilience for decades to come. Damaged industrial facilities, polluted water bodies, burned forests and fields, destroyed irrigation systems, and the accumulation of waste – all of these form a new ecological reality.

Environmental security has ceased to be a secondary field and has turned into a strategic element of national security. Food security depends on soil and water quality; public health and social resilience depend on air and ecosystem conditions; the ability to adapt to climate change defines economic development and integration into European structures.

The purpose of this study is to examine Ukraine's regional environmental challenges in 2022–2025, identify priority measures for adaptation and recovery, and analyse how national reforms and international cooperation can serve as the foundation for the country's ecological transformation [1].

1. Regional Environmental Challenges. Eastern and Southern Regions. These regions suffered the greatest destruction. Intense fighting was accompanied by explosions of industrial facilities and oil depots, leading to chemical leaks and oil spills. For example, in 2022, in Mykolaiv Oblast, damaged storage tanks caused petroleum products to seep into soil and groundwater. Residents of nearby villages had to rely on delivered water for several months. Another example is the destruction of irrigation systems in Kherson Oblast. Before the war, they ensured the stable production of vegetables and fruits, including for export. Today, thousands of hectares have turned into arid, degraded lands. This not only undermined local agriculture but also put regional food security at risk.

Of particular concern is the pollution of the Black and Azov Seas. Wastewater discharge and toxic substances entering rivers increase the risk of marine ecosystem collapse. Fish population decline and deteriorating water quality negatively affect fisheries and tourism, further aggravating the socio-economic situation.

Central and Western Regions. Although they were not subject to large-scale destruction, they face persistent environmental problems. In the Dnipro and Dniester basins, nitrate and phosphate levels are rising due to excessive fertilizer use. Water from these rivers serves as drinking water for millions of people, including in neighbouring countries, making this a transboundary issue. In Vinnytsia and Khmelnytskyi Oblasts, widespread monocultures (corn, sunflower) have led to soil degradation. According to JRC (2025), in some areas, soil fertility has declined by 20–30% over the past decade. In Zhytomyr Oblast, groundwater levels are falling, threatening both agriculture and water supply.

Thus, the ecological risk here is hidden but long-term: soil depletion and water shortages could eventually become as threatening as the direct consequences of war.

Western Borders and the Carpathians. The Carpathians face dual pressure. On the one hand, the war triggered a rise in illegal logging: wood became a substitute for heating amid gas supply disruptions. On the other hand, the region has seen a surge of internally displaced persons, increasing strain on ecosystems. In Ivano-Frankivsk Oblast, landslides were recorded on recently logged slopes, posing threats to rural settlements. At the same time, tourist influx has grown, with mountain trails and riverbanks suffering erosion from overuse. All of this reduces ecosystem resilience, increases flood risks, and leads to biodiversity loss.

Industrial Centers. Kryvyi Rih, Zaporizhzhia, and Dnipro have traditionally been hubs of metallurgy and heavy industry. Their plants were among the largest air polluters in Europe even before the war. The situation worsened after hostilities began: filtration and waste management systems were damaged, while surging construction and household waste created illegal dumps. In Kryvyi Rih, sulphur dioxide levels in 2023 were recorded at 5-6 times above permissible norms. In Dnipro, high concentrations of heavy metals were found in soils near unauthorized construction waste landfills. These conditions directly affect public health: respiratory diseases are on the rise, and child health indicators are deteriorating.

2. Recovery and Adaptation Efforts. Ukraine has taken steps toward ecological adaptation, though the scale of destruction and financial constraints slow progress. In the east, water supply systems are being restored. In Mykolaiv Oblast, new pipelines have been equipped with membrane filters, improving drinking water quality. In Kharkiv Oblast, local solar-powered stations are being tested to energize wastewater treatment plants, reducing vulnerability to power outages.

In western Ukraine, agroforestry practices are expanding. Shelterbelts are planted along fields, protecting soil from erosion, improving microclimates, and fostering biodiversity.

These projects, supported by international donors, are also integrated into farmer education programs.

In the industry, cooperation with the EBRD provides positive examples. In Zaporizhzhia, a metallurgical plant was modernized with state-of-the-art filters, reducing dust emissions by 30% and improving air quality. However, such projects remain isolated and insufficient to bring systemic change.

3. Policy Instruments and International Cooperation. Sustainable recovery is impossible without integrating Ukraine into European and international initiatives. The European Green Deal opens opportunities for legislative harmonization and access to financing. The case of Lviv illustrates this: cooperation with Poland introduced a waste separation system, now gradually spreading to other cities.

International climate funds already support Ukrainian initiatives. The Global Environment Facility funded a floodplain restoration project in Policia, returning natural functions to ecosystems and lowering flood risks. The Paris Agreement offers Ukraine access to carbon trading. For metallurgy, this is a chance to attract investment and modernize production. For example, if Ukrainian plants adopt CO₂ capture technologies, they could sell quotas while remaining competitive on the European market [2].

Civil society plays a vital role. Organizations like Ecoaction run air monitoring systems in industrial cities. Their publicly available data creates pressure on authorities and businesses. As a result, negotiations on modernizing treatment facilities have begun in Dnipro.

4. Forecasts and Scenarios for Environmental Recovery to 2030. Analysis of current trends suggests that Ukraine's environmental trajectory will depend on political choices, international support, and internal resilience. Three main scenarios are possible:

Inertia Scenario. If recovery proceeds slowly and focuses only on local damage, many environmental problems will persist by 2030. Land degradation in the east and south will continue without systematic reclamation. Water bodies will remain vulnerable, and industry will operate on outdated facilities.

Health risks will rise, especially respiratory illnesses. In Dnipro and Kryvyi Rih, childhood respiratory diseases could increase by 15–20 % if emissions remain high. In the Carpathians, deforestation could exacerbate floods and biodiversity loss.

Accelerated European Transition. A more optimistic scenario involves Ukraine's active integration into the European Green Deal and the broad use of climate funds. By

2030, major industries could be modernized, emissions reduced by 25–30 %, and waste separation introduced in all major cities.

Agriculture would transition to sustainable practices: organic fertilizers, agroforestry, and drip irrigation. Soil fertility would recover, and water pollution would decrease. The Dnipro and Dniester water systems could undergo partial rehabilitation, improving drinking water for millions. The Carpathians could become a model of sustainable development, with minimized illegal logging and eco-friendly tourism. Ukraine would integrate into cross-border European ecological projects, strengthening its role in EU climate policy [3].

Fragmented Recovery. This scenario assumes uneven progress. Some regions would gain access to aid and modernization, while others would lag behind. For example, western regions could develop agroecology and sustainable tourism, while eastern territories remain ecological risk zones. In the industry, only select enterprises would be modernized, leaving older industrial hubs polluted. Water system improvements would be local and piecemeal, without a comprehensive strategy. This would deepen regional inequalities, potentially fuelling long-term instability.

Key Projections to 2030:

- East and south require long-term ecological rehabilitation programs; otherwise, land degradation will become irreversible.
- Central and western regions must adopt sustainable land management or face water shortages and soil productivity decline.
- Industrial centres will remain high-risk zones without systemic modernization of metallurgy and chemical industries.
- The Carpathians could either become a model of sustainability or suffer catastrophic floods and biodiversity loss, depending on forest governance.

Thus, by 2030, Ukraine will have the chance to join Europe's ecological transformation and turn destruction into a foundation for sustainable development. But this requires strategic planning, coordinated state action, international partnerships, and active civil society engagement.

The environmental situation in Ukraine in 2022–2025 reflects both the destructive consequences of war and the opportunity for deep transformation. The east and south require ecosystem and water system restoration; the center and west need sustainable land use; industrial hubs must modernize production; and the Carpathians demand forest and biodiversity protection.

Examples of successful initiatives – from restoring water supply with modern technologies to EBRD-backed metallurgy upgrades – prove that sustainable development is possible. But it requires three components: national political will and reform, international partner support, and active civil society participation.

Ukraine has been given a unique chance: to turn the environmental crisis into the foundation for a new development model. If efforts are strategically united, the country can not only recover but also become part of Europe's Green Transition, where ecology underpins economic growth, social resilience, and international cooperation.

References

1. Пріоритети розвитку реального сектора в умовах війни та повоєнного відновлення економіки України : аналіт. доп. / [О. В. Собкевич, А. В. Шевченко, В. М. Русан та ін.] ; за загальн. ред. Я. А. Жаліла – Київ : НІСД, 2024. – 104 с.
2. Івашура А. А. Аналіз впровадження практик сталого споживання в Україні на основі зарубіжного досвіду / А. А. Івашура, О. М. Борисенко // Grail of Science. – 2023. – № 25. – С. 183-189.
3. Івашура А. А. Аналіз сталого споживання і виробництва в Україні / А. А. Івашура, О. М. Борисенко, М. Ф. Савченко та ін. // Technological innovation: engineering, manufacturing, agricultural complex and zoology : Collective Scientific Monograph. – Dallas, USA: Primedia eLaunch LLC, 2022. – P. 60-68.

Калініченко О. О.,
Мельников А. Ю., канд. техн. наук;
Нікітіна С. В.,
Волков Ю. В.,
Мартинюк Д. Т.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ПРОБЛЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА НОРМУВАННЯ БІОДОСТУПНИХ ФОРМ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В ҐРУНТАХ

Техногенне навантаження на природне середовище, що постійно збільшується – одна з важливіших проблем сучасності. Поряд з дослідженням токсичності забруднюючих речовин (ЗР) для різних біологічних організмів і процесів їх надходження у природні середовища останнім часом велика увага приділяється таким аспектам, як міграція і трансформація форм знаходження ЗР у середовищі [1 – 4]. У міру накопичення знань у цій галузі стає ясно, що даних про загальну концентрацію ЗР у тому чи іншому об'єкті середовища недостатньо для прогнозування токсичного ефекту на живі організми [5]. Дана проблема є загальною для всіх токсикантів, що надходять у навколишнє середовище, тому при визначенні рівня забруднення середовища рекомендується використовувати не тільки методи хімічного аналізу, але також і методи біомоніторингу, що дозволяє провести оцінку токсичності середовища з урахуванням доступності забруднювачів для організмів.

Лабораторні та польові дослідження забруднення ґрунтів продемонстрували, що біологічні ефекти не пов'язані із загальною концентрацією забруднювача в ґрунті. Ґрунтовий організм реагує лише на ту її частину, яка є біологічно доступною для нього. Це особливо стосується ґрунтів, які взаємодіють із ЗР таким чином, що значна її частина стає недоступною для організму за рахунок незворотної сорбції. Тобто на міграцію та розподіл ЗР впливає здатність ґрунту поглинати рідини, гази, сольові розчини і утримувати тверді частинки, а також живі мікроорганізми. Чим більша поглинальна здатність (ПЗ), тим більше зв'язана і менша рухлива/біодоступна частина концентрації ЗР.

Поглинальні процеси обумовлені переважно тонкодисперсною частиною ґрунту

і особливо колоїдами, вміст яких зазвичай не перевищує 30 % ґрунтової маси, але вплив їх на властивості і рівень родючості ґрунту надзвичайно великий. Поглинання ЗР ґрунтом відбувається за різними механізмами. Гедройц [6] виділяє п'ять видів ПЗ - механічну, фізичну, хімічну, фізико-хімічну і біологічну.

Механічна ПЗ (пов'язана з механічним складом і структурою ґрунту) – це властивість ґрунту не пропускати частинки, які мають розміри більші, ніж ґрунтові пори. Чим дрібніші ґрунтові пори, тим більша ПЗ ґрунту. Суглинисті і глинисті ґрунти мають більшу ПЗ, ніж піщані і кам'яністі. Механічна ПЗ зростає при збільшенні вмісту гумусу. Гумус, вкриваючи тонкою плівкою мінеральні частинки, зменшує просвіт пор. Завдяки механічній ПЗ у ґрунті утримуються від вимивання в глибокі горизонти дрібні частинки, які містять як поживні речовини, так і ЗР.

Біологічна ПЗ зумовлена життєдіяльністю ґрунтових мікроорганізмів і рослин, які засвоюють із ґрунту рухливі речовини і переводять їх у тканини власного тіла. Особливо велике значення має цей вид ПЗ для нітратів, які поглинаються і закріплюються в ґрунті тільки біологічно. Біологічна ПЗ має вибірковий характер, рослини з ґрунту засвоюють лише речовини, які мають життєво важливе значення.

Фізична ПЗ формується за рахунок взаємодії твердих частинок ґрунту з поровою водою, утримування молекул води на своїй поверхні і молекулярної адсорбції розчинених у поровій воді речовин. Внаслідок фізичної ПЗ концентрація розчиненої речовини на межі розділу дисперсійного середовища і дисперсної фази змінюється. Фізична ПЗ збільшується при збільшенні загальної поверхні твердої речовини ґрунту. Завдяки фізичній ПЗ ґрунт утримує, зокрема, аміак, необхідний для живлення рослин.

У ґрунтах найбільш поширена позитивна адсорбція – збільшення концентрації речовини на поверхні колоїдів. Значно рідше зустрічається негативна адсорбція – зменшення концентрації речовин на поверхні дисперсної фази та її збільшення в дисперсійному середовищі. Наприклад вимивання аніонів з ґрунту при низхідному пересуванні води: у разі вимивання солестійких аніонів таких, як хлориди та сульфати – це позитивне явище, а при втраті нітратів, фосфатів та інших поживних речовин – негативне.

Хімічна ПЗ зумовлена здатністю аніонів розчинених солей утворювати з катіонами нерозчинні сполуки, що випадають в осад і змішуються з твердою фазою ґрунту. Наприклад, розчинний суперфосфат $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ у ґрунті може вступати в реакцію з солями заліза, утворюючи нерозчинний FePO_4 , а з солями кальцію – важкорозчинний ортофосфат кальцію $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. За рахунок хімічної ПЗ у

карбонатному горизонті можливе накопичення важкорозчинного кальциту CaCO_3 . Не всі речовини можуть поглинатись хімічно, наприклад, нітрати, які з усіма катіонами утворюють розчинні солі і тому легко вимиваються з ґрунту.

Фізико-хімічна (обмінна) ПЗ зумовлена обміном частини іонів з поверхні твердої фази (дифузного шару колоїдних міцел) на еквівалентну кількість іонів, що знаходяться в оточуючому ґрунтовому розчині.

Для оцінювання біодоступної концентрації, крім механізмів ПЗ ґрунту, не менш важливе значення мають механізми вивільнення поглинутих речовин із ґрунтової матриці, вивільнення залежить від місцевих характеристик, зокрема від рН ґрунту.

Доступна концентрація речовини може бути розрізнена на

а) потенційно доступну концентрацію речовини, наприклад, максимальну концентрацію, яка може бути вивільнена за заздалегідь визначених найгірших умов;

б) фактичну концентрацію розчиненої речовини за наявних місцевих умов середовища.

Для різних значень діапазону рН можливі різні сценарії формування фактичної концентрації речовини в ґрунті. Дуже низькі значення рН (від 0,5 до 2 од. рН) мають місце у разі потрапляння ґрунту в шлунок людини, тоді як діапазон від 4 до 8 од. рН є типовим для ґрунтів. Вищі значення рН (від 9 до 13 од. рН) можуть зустрічатися при лужних видах обробки ґрунту.

Взаємозв'язки між вивільненням ЗР із ґрунтової матриці та їх біодоступною концентрацією складні і залежать від хімічних форм, в яких зустрічаються ЗР. Наприклад, при низькому рН метали переважно зустрічаються у формі вільних катіонів Me^{2+} , яка, вважається основним біодоступним видом металу. В діапазоні від помірно кислого до лужного середовища **від 4 до 8 од. рН** метали утворюють міцні комплекси з розчиненою органічною речовиною, зокрема гуміновими та фульво-кислотами. Вважається, що біодоступність цих комплексних видів нижча, ніж вільних іонів металів. Крім того, метали при середньому та високому рН також можуть утворювати більш лабільні та, можливо, біодоступні комплекси з такими неорганічними аніонами, як хлорид, гідроксид та гідрокарбонат.

Під рухомими і біодоступними формами мікро- і макрокомпонентів розуміють сполуки, які легко переходять у різні витяжки, а саме водорозчинні сполуки, обмінні форми і сполуки, розчинні в кислотах низької концентрації та буферних розчинах.

Здавна для вивчення біодоступних/рухомих форм, процесів міграції та акумуляції різних сполук використовується метод ґрунтових витяжок, який базується на властивості тих чи інших розчинників екстрагувати з ґрунту конкретні сполуки чи їх групи. Ґрунтова витяжка – це фільтрат розчинника заданої концентрації та заданого складу, що взаємодіє з ґрунтом певний час і при певному співвідношенні з ним. Запропоновано багато різновидів витяжок, які відрізняються за складом та екстрагуючою здатністю. Вид ґрунтової витяжки визначається метою дослідження.

Для визначення загального (валового) вмісту елементу у ґрунті проводять повне розкладання проби ґрунту.

Для визначення водорозчинних рухомих форм (нітратів, сульфатів, хлоридів, водорозчинних форм металів, солоності ґрунту, тощо) використовують водну витяжку, яка характеризується низькою ефективністю вилучення та підходить для оцінювання доступності для рослин, коли потрібно імітувати природні умови.

Для визначення обмінних рухомих форм кальцію, магнію, калію та інших елементів, які теж можуть бути доступними для рослин, використовують сольову витяжку, яка характеризується більш високою ефективністю вилучення.

Для визначення загальної кількості рухомих, доступних для поглинання рослинами форм як поживних речовин, так і ЗР, найчастіше використовують кислотні і буферні витяжки, які характеризуються більш сильним впливом на ґрунт, вилученням більш широкого спектру рухомих форм.

Оскільки визначення рухомих форм мікроелементів у цих витяжках має на меті виявити ступінь забезпеченості ґрунтів доступними для живлення, акумуляції мікроелементами, результати аналізу витяжок повинні бути зіставлені з результатами польових і вегетаційних дослідів, а також з концентраціями мікроелементів у самих рослинах. Без такого порівняння отримані результати є грубо оціночними.

Раніше для забезпечення ґрунтів рухомими формами мікроелементів переважно користувались системою витяжок Пейве і Рінкиса, за якою сполуки бору витягуються водою, марганцю – 0,1 н сірчаною кислотою, міді – 1 н соляною кислотою, кобальту 1 н азотною кислотою, цинку – 1 н хлоридом калію, молібдену – оксалатною витяжкою. Паралельно розвивалась практика використання однієї витяжки для декількох мікроелементів, що дозволяє зіставляти між собою концентрації різних мікроелементів, збільшити інформативність і швидкість аналізу, здешевити його.

У 50-70-ті роки роботами К.К. Гедройца [6] було закладено основи методології вивчення доступності речовин і їх нормування у ґрунтах. Сучасні

нормативи вмісту рухомих форм металів у ґрунті базуються на екстракції **ацетатно-амонійним буферним розчином з рН 4,8 од. рН (ААБ)**, оскільки концентрація металів у цій витяжці добре корелює з їх вмістом у більшості видів рослин. Вважається, що ААБ витягує головним чином добре рухомі (водорозчинні) та помірно рухомі (обмінні форми), одночасно добре задовольняє вимогам універсального екстрагента. Тому для визначення вмісту рухомих форм металів в лабораторній практиці екологічних, агрохімічних служб України використовується саме ААБ. При цьому зауважимо, що ступінь вилучення металів з ґрунту за допомогою ААБ визначається не стільки міцністю зв'язку металу з ґрунтовими компонентами, скільки стійкістю сполук, утворюваних ним з компонентами екстрагуючого розчину. Одним з факторів, що визначає ступінь екстрагованості металу ААБ витяжкою є підготовка проб, а саме ступінь подрібнення.

Лабораторна практика аналогічних служб країн Європейського Союзу орієнтується на рекомендації міжнародного стандарту ISO 17402:2008 [7], який Україна у 2013 р. прийняла у якості національного [8]. У цьому стандарті наведено порівняння методів визначення біодоступної концентрації ЗР. У разі металів результати отримують у дослідженнях із використанням кислотної витяжки, вона витягує не тільки добре рухомі (водорозчинні) та помірно рухомі (обмінні форми), але й мало рухомі форми (комплекси з органічною речовиною ґрунту, карбонати), сума яких характеризує весь запас потенційно-доступних сполук, та найкраще відповідає найгіршому сценарію фізіологічної моделі впливу. Тому для подальшої розробки та міжнародної стандартизації ДСТУ ISO 17402 рекомендує саме методи дослідження на базі кислотних витяжок. При цьому необхідно відмітити, що для підтримання у витяжці рН на рівні 0,5 - 1,0 **од. рН**, необхідно визначити буферну здатність ґрунту, вміст обмінних кислот (алюмінію та водню), органічної речовини та тип ґрунтоутворення, що дозволяє зрозуміти, як ґрунт реагує на додавання кислот і які фактори впливають на його рН, що є критичним для проведення точних аналізів і подальшої корекції кислотності.

В лабораторії еколого-аналітичних досліджень УКРНДІЕП проведено порівняльне вивчення вилуговування важких металів, на прикладі міді, нікелю, кобальту, кадмію та цинку, двома екстрагентами: **ААБ витяжкою з рН = 4,8 од. рН відповідно до рекомендацій національних стандартів ДСТУ 4770.1 – ДСТУ 4770.9 та витяжкою розбавленим розчином азотної кислоти з рН ~ 0,5 од. рН відповідно до ISO 17586**. В обох випадках співвідношення ґрунт: розчин було 1:10. Після

отримання ґрунтових витяжок за процедурами, вказаними в зазначених вище нормативних документах, визначали концентрацію важких металів атомно-спектральними методами.

Дослідження проведено на 5 пробах ґрунту, відібраних з території місця видалення відходів (МВВ) та поблизу нього за сторонами горизонту. Результати порівняння частки вилучених обома витяжками рухомих форм металів відносно їх валового вмісту у пробі ґрунту, наведено на рисунках 1 та 2.

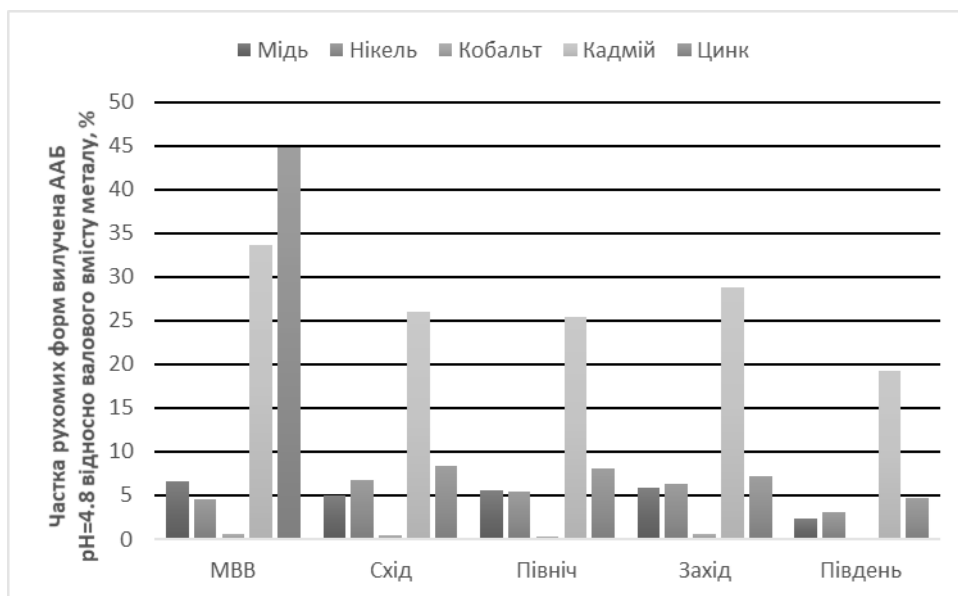


Рисунок 1 – Частка рухомих форм металів, вилучена ААВ рН=4,8 од. рН, відносно валового вмісту металу.

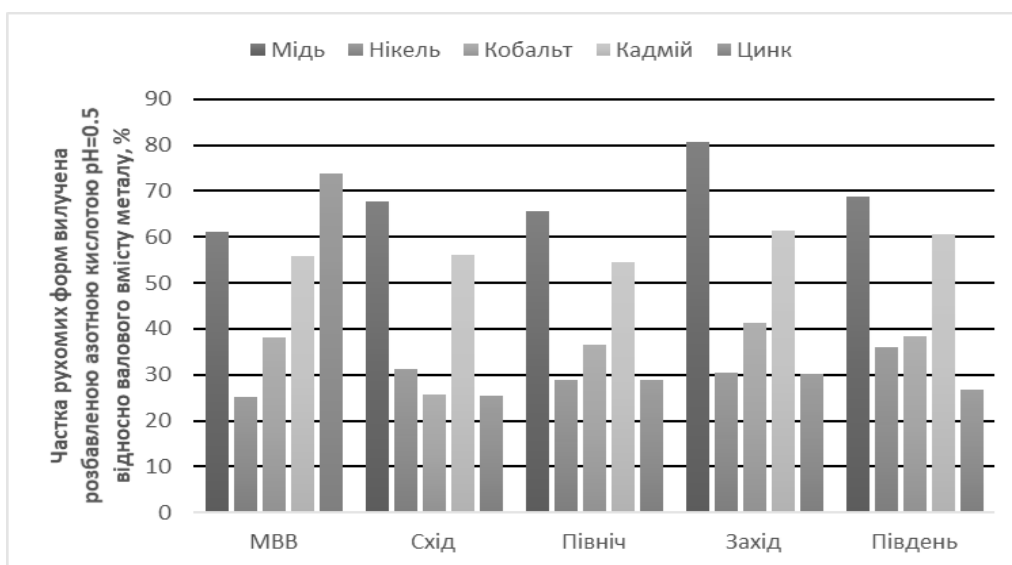


Рисунок 2 – Частка рухомих форм металів, вилучена розбавленою азотною кислотою рН ~ 0,5 од. рН, відносно валового вмісту металу.

Як видно для всіх досліджених металів у всіх пробах ефективність вилучення кислотною витяжкою $\text{pH} \sim 0,5$ од. pH набагато більша, ніж у разі використання ААБ $\text{pH} = 4,8$ од. pH , для деяких металів на порядки. Суттєво більша ефективність вилучення кислотною витяжкою (як за номенклатурою вилучених металів, так і за концентрацією їх рухомих форм) створює перевагу щодо можливості використання менш чутливих хіміко-аналітичних методів, проведення вимірювань з меншою похибкою, використання і створення універсальних багатокомпонентних методик визначення. До того ж використання розведеної азотної кислоти забезпечує менше заважаючих впливів при дослідженні витяжок за рахунок простішої процедури приготування екстрагенту та меншого вмісту солей.

З урахуванням вказаних переваг кислотних витяжок, а також євроінтеграційних прагнень України та прийняття ISO 17402:2008 [8] в якості національного здається доцільним у разі дослідження рухомих/біодоступних форм металів перейти на використання кислотної витяжки $\text{pH} \sim 0,5$ од. **pH** . **Вочевидь, такий перехід потребує** розроблення та прийняття нових нормативів для концентрацій рухомих форм металів у ґрунті.

Література

1. Линник П.Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / П.Н. Линник, Б.И. Набиванец / Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. - 241 с.
2. Холин Ю.В. Гумусовые кислоты как главные природные комплексообразующие вещества // Университеты. Наука и просвещение-2001.-№4
3. Karner D.A. An algal probe for copper speciation in marine waters: laboratory method development / D.A. Karner, M.M. Shafer, J.T. Overdier, J.D.C. Hemming, W.C. Sonzogni // Environmental Toxicology and Chemistry- 2006.- Vol. 25, №4 - P. 1106-1113
4. Mercier F. Study of the repartition of metallic trace elements in humic acids colloids: potentialities of nuclear microprobe and complementary techniques / F. Mercier, V. Moulin, N. Barre, F. Casanova, P. Toulhoat // Analytica Chimica Acta-2001.-№427.-P. 101-110
5. Beceiro-Gonzalez E. Interaction between metallic species and biological substrates: approximation to possible interaction mechanisms between the alga *Chlorella vulgaris* and arsenic (III) / E. Beceiro-Gonzalez, A. Taboada-de la Calzada, E. Alonso-Rodriguez, P. Lopez-Mahia, S. Muniategui-Lorenzo, D. Prada-Rodriguez // Trends in Analytical Chemistry - 2000 - Vol. 19, №8

6. Гедройц К.К. Химический анализ почв. Избранные сочинения. М. - Т. 2.- 1955.- 601 с
7. ISO 17402:2008 Soil quality — Requirements and guidance for the selection and application of methods for the assessment of bioavailability of contaminants in soil and soil materials
8. ДСТУ ISO 17402:2013 «Якість ґрунту. Відбір та застосування методів оцінки біодоступності забруднюючих речовин у ґрунтах та ґрунтових матеріалах. Вимоги та керівництво» (ISO 17402:2008, IDT)

Квасов П. В., аспірант;

Продащук М. В., аспірант;

Кім К. В., канд. психол. наук;

Продащук С. М., канд. техн. наук

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна

АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ ДОЩОВОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ ВОКЗАЛАХ ДО СУЧАСНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Наразі у багатьох регіонах України та Європи спостерігається тенденція до зростання кількості короточасних, але інтенсивних опадів. Згідно з [1], частота та інтенсивність сильних опадів зросла в більшості регіонів з 1950 року. Людський вплив, ймовірно, є основним рушієм цих змін. Надзвичайно ймовірно, що в більшості регіонів суші, сильні опади стануть частішими та інтенсивнішими з додатковим глобальним потеплінням. Прогнозоване збільшення екстремальних значень сильних опадів означає збільшення частоти та величини плювіальних повеней. Імовірність складних екстремальних подій, ймовірно, зросла через зміни клімату, спричинені людиною. Одночасні хвилі спеки та посухи стали частішими протягом останнього століття, і ця тенденція продовжуватиметься з вищим глобальним потеплінням. Імовірність складних повеней (штормових нагонів, екстремальних опадів та/або течії річок) зросла в деяких місцях і продовжуватиме збільшуватися як через підвищення рівня моря, так і через збільшення рясних опадів, включаючи зміни в інтенсивності опадів, пов'язані з тропічними циклонами. Системи каналізації на об'єктах залізничної інфраструктури проектувались за нормативами, зокрема ДБН В.2.5-75:2013 [2], які можуть не враховувати сучасні гідрометеорологічні ризики.

Згідно з таблицею TS.5 та графіками (аналіз сценаріїв RCP4.5 та RCP8.5), наведеної в [1], свідчить про ймовірне зростання добових максимумів опадів на до середини XXI ст. Сценарії RCP4.5 та RCP8.5 - це кліматичні прогнози, які описують різні варіанти майбутніх викидів парникових газів і впливу на глобальну температуру до 2100 року. RCP4.5 - помірний сценарій, в якому глобальні викиди стабілізуються завдяки політиці скорочення. І сценарії використовуються в моделюванні кліматичних наслідків: зміни опадів, температур, екстремальних явищ. Згідно з рис. 7 наведеного у [3], кількість опадів на заході та північному заході України може збільшитися на 20% до кінця століття. У [2] у таблиці A1 наведено дані розрахункових інтенсивностей дощу

для міст України. Доцільно розглянути ці зміни на прикладі міста Луцьк. Згідно з таблицею А1 [2] розрахункова інтенсивність дощу для міста Луцьк становить 104 л/с·га. Значить при збільшенні кількості опадів у регіоні на 20% ця величина вже буде дорівнювати 128.8 л/с·га., що певним чином вплине на пропускну спроможність системи каналізації.

В середньому понад 2 мільярди людей щороку подорожують залізницею. Приблизно 5700 станцій мають високий потік пасажирів, особливо у великих містах та транспортних вузлах. Надійне водовідведення платформ особливо важливе для забезпечення безпеки пасажирів. [3]

Кожний збудований вокзал має певний термін експлуатації, таким чином необхідно враховувати можливе збільшення кількості опадів, бо вже через певний проміжок часу може статися ситуація, коли вокзал ще має певний проектний термін експлуатації, однак система дощової каналізації не буде витримувати навантаження від опадів. Таким чином, можуть затоплюватися платформи на вокзалах, змиватися баласт з колій, що потребуватиме наявності додаткового персоналу для відновлювально-ремонтних робіт. Окрім перегляду існуючих нормативів для проектування також є необхідним облаштування акумулювальних резервуарів або затримуючих ємностей. Акумулювальні резервуари або затримуючі ємності є важливими елементами системи дощової каналізації на залізничних вокзалах. Вони забезпечують тимчасове зберігання дощових вод, що дозволяє уникнути перевантаження каналізаційної мережі під час інтенсивних опадів. Такі резервуари допомагають зменшити ризик підтоплення території вокзалу, зберігаючи безпеку пасажирів та збереження інфраструктури. Наступним кроком може бути монтаж нових дощоприймачів із попереднім очищенням, що дасть змогу ефективно затримувати механічні забруднення та нафтопродукти ще на етапі первинного збору стічних вод, зменшити навантаження на основну систему очищення та підвищити загальну надійність і екологічну безпеку дощової каналізації.

У роботі обґрунтовано технічну та нормативну необхідність адаптації систем дощового водовідведення на залізничних вокзалах. Розроблені пропозиції можуть бути використані при реконструкції або модернізації існуючих мереж з урахуванням змін клімату.

Література

1. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Technical Summary – стр. 84. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf
2. ДБН В.2.5-75:2013 «Каналізація. Зовнішні мережі та споруди». - Київ: Мінрегіонбуд, 2013.
3. Rainwater Management for Railway Stations. Railway Platforms. URL: <https://www.hauraton.com/en-int/application-areas/railway-platform/>

Клімов О. В., канд. геогр. наук;

Надточій Г. С.,

Клімов Д. О.,

Гайдріх І. М.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

Філатова О. В.², канд. біол. наук

Комунальний заклад «Харківська гуманітарно-педагогічна академія» Харківської обласної Ради, м. Харків, Україна

СТАН ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ НА ТЕРИТОРІЇ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Природні комплекси Харківської області збереглись на площі 27,4 % від її загальної площі, а саме: лісові – на площі 13 %, степові – на площі 13,4 % та водно-болотні угіддя – на площі 1%.

Інші площі – антропогенно модифіковані територіальні комплекси.

У цих умовах існує сучасне біорізноманіття області.

Важливою формою оцінки стану збереження біорізноманіття області є чисельність видів флори і фауни, що занесені до переліків, що визначають регіональний, національний чи міжнародний статус видів, які мешкають в області.

Рослинний світ Харківської області в своєму складі налічує 1257 видів дикорослих судинних рослин, з яких 298 видів потребують особливої охорони, що складає 23,7 % від їх загальної кількості (табл. 1).

Таблиця 1 – Кількість видів рослин та грибів, що підлягають особливій охороні на території Харківської області

Національні та міжнародні зобов'язання	Кількість видів
Перелік регіонально рідкісних рослин	198
Червона книга України (Перелік видів рослин та грибів..., 2021)	107
Конвенція про міжнародну торгівлю видами дикої флори і фауни, що перебувають під загрозою зникнення (CITES)	17
Конвенція про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі	8
Європейський червоний список	22
Червоний список Міжнародного союзу охорони природи (МСОП)	9

Світ хребетних тварин області налічує 390 видів, з яких 322 види потребують особливої охорони, що складає 82 % від загальної кількості видів (табл. 2)

Таблиця 2 – Кількість видів хребетних тварин, які потребують особливої охорони на території Харківської області

Національні та міжнародні зобов'язання	Кількість видів
Перелік регіонально рідкісних тварин	49
Червона книга України (Перелік видів тварин..., 2021)	176
Конвенція про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі	311
Конвенція про збереження мігруючих видів диких тварин (CMS)	171
Конвенція про міжнародну торгівлю видами дикої флори і фауни, що перебувають під загрозою зникнення (CITES)	25
Угода про збереження афро-євразійських мігруючих водно-болотних птахів (AEWA)	93
Угода про збереження кажанів в Європі (EUROBATS)	14
Європейський червоний список	44
Червоний список Міжнародного союзу охорони природи (МСОП)	33

Особливу роль у збереженні біологічного різноманіття повинна відігравати можливість збереження ландшафтного різноманіття області за допомогою системи природних територій, що потребують особливої охорони, які в області представлені природно-заповідним фондом та екологічною мережею.

У складі природно-заповідного фонду області налічується 247 територій та об'єктів, загальною площею понад 75 тис. га, що складає 2,4 % від загальної площі області. Цього занадто замало для території площею 27,4 % від загальної площі області, на якій ще зберігаються природні комплекси.

На відміну від природно-заповідного фонду, який зберігає окремі фрагменти природних комплексів, просторова екологічна мережа області повинна вирішувати важливу функцію – з'єднання їх між собою.

Екомережа області за допомогою запроектованих природних коридорів повинна з'єднати фрагменти природних комплексів, які збереглися, між собою і забезпечити безперервність міграції рослин і тварин та біокомунікації біорізноманіття на її території.

Таким чином, формування єдиної системи природних територій, що потребують особливої охорони в області, є ключем до збереження і об'єднання фрагментованих природних комплексів як середовища, необхідного для виживання існуючого біологічного різноманіття Харківської області.

Література

1. Конвенція про збереження мігруючих видів диких тварин. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_136#Text
2. Конвенція про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_129#Text
3. Конвенція про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі. Берн, 19 вересня 1979 року. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_032#Text
4. ПЕРЕЛІК видів рослин та грибів, що заносяться до Червоної книги України (рослинний світ). ЗАТВЕРДЖЕНО Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 15 лютого 2021 року № 111. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0370-21#n17>
5. **ПЕРЕЛІК видів тварин, що підлягають особливій охороні на території Харківської області.** ЗАТВЕРДЖЕНО Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України 27 червня 2018 року № 237. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 19 липня 2018 р. за № 847/32299. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0847-18#Text>
6. ПЕРЕЛІК видів тварин, що заносяться до Червоної книги України (тваринний світ). ЗАТВЕРДЖЕНО Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 19 січня 2021 року № 29. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0260-21#Text>
7. ПОЛОЖЕННЯ про Перелік видів рослин, що підлягають особливій охороні на території Харківської області. ЗАТВЕРДЖЕНО рішенням обласної ради від 30 жовтня 2001 р. // Офіційні переліки регіонально рідкісних рослин адміністративних територій України (довідкове видання) / Укладачі: докт. біол. наук, проф. Т.Л. Андрієнко, канд. біол. наук М.М. Перегрим. – Київ: Альтерпрес, 2012. – 148 с.
8. Угода про збереження кажанів в Європі. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_011#Text
9. Agreement on the Conservation of African-Eurasian Migratory Waterbirds (AEWA). As amended at the 8 th Session of the Meeting of the Parties to AEWA 26 - 30 September 2022, Budapest, Hungary. URL: https://www.unep-aewa.org/sites/default/files/instrument/aewa_agreement_text_2023-2025_mop8.pdf

¹Клочко Т. О., канд. техн. наук;

²Коваленко С. Ю., PhD;

²Брук В. В., канд. техн. наук;

¹Сломчинська Н. В., аспірантка

¹Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна

²Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ШКОДИ ТА ЗБИТКІВ

На теперішній час розроблені та затверджені 8 [1–8] методик визначення шкоди та збитків, завданих різним компонентам довкілля внаслідок російської збройної агресії проти України. У цих методиках передбачається можливість використання у якості вихідних даних космічних знімків. Але в жодній з них не наведені рекомендації, яким чином слід використовувати дані матеріали. Це обумовлює необхідність розробки методичних рекомендацій щодо використання матеріалів дистанційного зондування для оцінки змін стану природних компонентів внаслідок збройної агресії. Особливо актуальність роботи підсилюється тим, що у більшості випадків неможливо застосування будь-яких інших методів моніторингу стану довкілля на тимчасово окупованих територіях, крім дистанційних методів. Метою дослідження є аналіз можливостей застосування дистанційної інформації для визначення екологічної шкоди та збитків.

Показники, що використовуються для визначення шкоди та розрахунку збитків, оцінюються за допомогою контактних методів (відбір і фізико-хімічний аналіз проб, контактні вимірювання, метричні вимірювання та інше). Однак, у разі відсутності доступу застосування контактних методів є неможливим. У цьому випадку фіксування екологічної шкоди і вимірювання деяких показників можливо тільки за допомогою дистанційних методів. Наприклад, дистанційно можна виміряти показник, на якому базується розрахунок збитків – площа пошкодженої (забрудненої, засміченої) території або акваторії. Крім того, під час розрахунку збитків для різних компонентів довкілля, крім площі, можливо дистанційне вимірювання інших параметрів.

Визначення збитків, заподіяних водним об'єктам внаслідок забруднення та/або засмічення вод, самовільного користування водою ґрунтується на методиках [1, 2]. За матеріалами дистанційного зондування можна визначити такі параметри шкоди як ступінь засмічення водного об'єкта сторонніми предметами, матеріалами, відходами та/або іншими речовинами за зовнішнім виглядом водної поверхні.

Методика визначення збитків для морських акваторій [3] встановлює порядок розрахунку розміру збитків у разі забруднення та/або засмічення морських вод від суден, кораблів та інших плавучих засобів, у тому числі військових. За матеріалами дистанційного зондування можна визначити такі параметри шкоди: просторове розподілення та розміри забруднення акваторії нафтою або нафтопродуктами; просторове розподілення та розміри забруднення сніжно-льодової поверхні нафтою або нафтопродуктами; просторове розподілення та розміри забруднення акваторії сторонніми предметами, матеріалами, відходами та/або іншими речовинами.

Методика [4] визначає розрахунок збитків від шкоди, що «завдана ґрунтам та земельним ділянкам внаслідок забруднення ґрунтів речовинами, які негативно впливають на їх родючість та інші корисні властивості; шкода, завдана ґрунтам та земельним ділянкам внаслідок засмічення земельних ділянок сторонніми предметами, матеріалами, відходами та/або іншими речовинами». За матеріалами дистанційного зондування можна визначити такі параметри шкоди: просторове розподілення та розміри забруднення земельної ділянки; просторове розподілення та розміри засмічення земельної ділянки; ступінь засмічення земельної ділянки відходами.

Методика [5] оцінює втрати надр, завдані самовільним їх користуванням. Визначаються «обсяг самовільного, зокрема незаконного, користування надрами; збитки, завдані внаслідок самовільного користування надрами». За матеріалами дистанційного зондування можна визначити такі параметри шкоди: об'єм (кількість) самовільно видобутих корисних копалин; розмір об'єму (площі) користування надрами в цілях, не пов'язаних з видобуванням корисних копалин; період самовільного користування надрами.

Методика [6] визначає збитки, завдані через «втрати лісогосподарського виробництва, спричинені обмеженням прав землекористувачів; втрати лісочористувачів, заподіяні тимчасовим зайняттям земельних ділянок, встановленням обмежень щодо їх використання та неодержанням доходів у зв'язку з тимчасовим невикористанням земельних ділянок». За матеріалами дистанційного зондування можна визначити такі параметри шкоди, що використовуються для нарахування

збитків: просторове розподілення та розміри пошкодженої або замінованої ділянки; просторове розподілення та розміри лісових ділянок вкритих лісовою рослинністю (окуповані території); термін самовільного користування лісовими ділянками вкритими лісовою рослинністю (окупація) (в роках); маса деревини, метрів кубічних; просторове розподілення та розміри лісової ділянки, на якій заплановано проведення заготівлі деревини, гектари; просторове розподілення та розміри лісової ділянки, яка виділена у тимчасове користування гектари; кількість знищених чи пошкоджених біологічних технічних споруд; кількість знищених мисливських тварин; кількість знищених чи пошкоджених штучних гнізд мисливських птахів.

Методика [7] визначає збитки, завдані природним територіям та об'єктам внаслідок їх пошкодження чи знищення.

За матеріалами дистанційного зондування можна визначити кількість типів біогеоценозів, що використовуються для нарахування збитків.

Методика [8] визначає збитки, завдані викидами забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Основним показником, який оцінюється, є обсяг неорганізованих викидів. За матеріалами дистанційного зондування можна визначити такі параметри шкоди: просторове розподілення та розміри пожежі; тривалість подій.

У даній роботі можливості використання космічних знімків для оцінки екологічних збитків розглянуті на прикладі засмічення морської акваторії після руйнування греблі Каховської ГЕС. Для визначення потенційної наявності розповсюдження завислих речовин та засмічення морської акваторії сторонніми предметами у Дніпровсько-Бузькому лимані та прилеглої акваторії Чорного моря використано космічний знімок супутника Landsat 9 (рис. 1). Вибір саме цього типу матеріалів дистанційного зондування обумовлено низкою їх переваг. Апаратура супутника Landsat 9 є важливим інструментом для відстеження змін Землі, викликаних як природними процесами, так і діяльністю людини. Знімки КА Landsat знаходяться у вільному доступі. Існує можливість вибору та комбінації спектральних каналів для спостереження процесів, що відбуваються у акваторії. На рисунку космічний знімок засмічення морської акваторії наведено у колірній моделі RGB (Red, Green, Blue) – це адитивна модель представлення кольорів, яка використовує комбінації червоного, зеленого та синього кольорів для створення різноманітних відтінків, що підкреслюють сторонні предмети на акваторії.

Матеріал, що виносився з Каховського водосховища складався з побутового сміття, будівельних відходів, а також сміття, що було на прибережних територіях.

Кількість механічного матеріалу, яке потрапило в море, залишається невідомою. Течія сформувала скупчення, які на знімку відображені у вигляді точок, полос, островів. Такі структури змінюють водну поверхню, сповільнюючи хвилювання, що змінює характер відбивної здатності. Таке явище спостерігається у вигляді великої плями, що світліша за кольором. Тони відходів руйнації знаходиться у Чорному морі і зараз продовжують розповсюджуватись по акваторії.



Рисунок 1 – Космічний знімок засмічення морської акваторії сторонніми предметами після підризу Каховської дамби (дата зйомки 09.06.2023 року).

Збитки, завдані водним об'єктам внаслідок засмічення сторонніми предметами, матеріалами, відходами або іншими речовинами розраховуються за формулою:

$$З = K_B \cdot K_X \cdot k_3 \cdot M_{CM} \cdot g \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

де $З$ – розмір збитків, завданих водним об'єктам внаслідок засмічення сторонніми предметами, матеріалами, відходами або іншими речовинами, грн;

K_B – коефіцієнт, що враховує збільшення шкоди водній екосистемі під час воєнного стану $K_B = 10$;

K_x – коефіцієнт, що характеризує ступінь засмічення поверхні води сторонніми предметами, матеріалами, відходами та/або іншими речовинами. Визначений згідно з методичними рекомендаціями за ознаками (Зовнішній вигляд водної поверхні: на водній поверхні та/або занурені у воду є сторонні предмети, матеріали, відходи та/або інші речовини загальною площею більше 10 м^2 , крупні предмети з розмірами більш $1,5 \text{ м}$) коефіцієнт $K_x = 6$;

k_3 – коефіцієнт ураженості водної екосистеми або морських вод відповідно $1,5$;

$M_{\text{см}}$ – маса сторонніх предметів, матеріалів, відходів та/або інших речовин, кг;

g – проіндексований питомий економічний збиток від забруднення водних ресурсів у поточному році, грн/т (складає $2429,83 \text{ грн/т}$).

$$З = 10 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 10000 \cdot 2429,83 \cdot 10^{-3} = 2186847 \text{ грн.}$$

Розрахований розмір збитків, завданих водним об'єктам внаслідок засмічення сторонніми предметами, матеріалами, відходами або іншими речовинами складає $2,2$ млн. гривен.

Висновки

Під час військових конфліктів збільшуються факти порушення екологічної безпеки довкілля включно зі знищенням екосистем.

Визначення шкоди та завданих збитків ґрунтується на методичних рекомендаціях для розрахунку обсягів компенсації державі та подання позовів на компенсацію до міжнародних судових органів.

Під час визначення шкоди та збитків відповідальним органам рекомендується використовувати дані дистанційного зондування але відсутні методичні рекомендації щодо їх застосування.

Застосування дистанційного моніторингу дає змогу виявити ділянки та параметри шкоди, що завдані навколишньому середовищу. У роботі визначені показники для розрахунку збитків, що можна оцінювати дистанційно. Під час розрахунку відповідно до Методик одним із загальних параметрів, що визначає збитки, є площа. Але для кожного компонента довкілля визначаються також специфічні показники. Наведений приклад розрахунку на основі аналізу космічного знімку екологічних збитків, що зазнала частина акваторії Чорного моря внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС.

Література

1. «Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів» Методика від 20.07.2009 № 389, Редакція від 18.11.2022 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0767-09#Text>. Дата звернення 22.05.2025р.
2. «Методика визначення збитків, заподіяних внаслідок забруднення та/або засмічення вод, самовільного користування водними ресурсами», затверджена наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 21 липня 2022 року № 252 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show>. Дата звернення 22.05.2025р.
3. «Методика визначення збитків, заподіяних навколишньому природному середовищу в межах територіального моря, виключної морської (економічної) зони та внутрішніх морських вод України в Азовському та Чорному морях» від 19.08.2022 № 309 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show>. Дата звернення 22.05.2025р.
4. «Методика визначення розміру шкоди завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій та/або збройної агресії та бойових дій під час дії воєнного стану» від 04.04.2022 № 167 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show>. Дата звернення 22.05.2025р.
5. «Методика визначення розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок самовільного користування надрами» від 15.09.2022 № 366 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show>. Дата звернення 22.05.2025р.
6. «Про затвердження Методики визначення шкоди та збитків, заподіяних лісовому фонду внаслідок збройної агресії Російської Федерації» Методика від 05.10.2022 № 414. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1308-22#Text>. Дата звернення 22.05.2025р.
7. «Методика визначення шкоди та збитків, завданих територіям та об'єктам природно-заповідного фонду внаслідок збройної агресії Російської Федерації» від 15.10.2022 № 424 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show>. Дата звернення 22.05.2025р.
8. «Методика розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин в атмосферне повітря внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди» від 13.04.2022 № 175 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show>. Дата звернення 22.05.2025р.

Kovalenko S. Yu., PhD,

*Scientific Research Institution «Ukrainian Scientific and Research Institute of Ecological Problems»,
Kharkiv, Ukraine*

Ponomarenko R. V., Dr. Sci. (Engin.),

*Institute of scientific research on civil protection National University of Civil Protection of Ukraine,
Dmytrivka, Kyiv oblast, Ukraine*

Tretyakov O. V., Dr. Sci. (Engin.)

State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS OF SURFACE WATER BODIES

The principle of international water management in transboundary river basins is that water-related issues should be addressed at the basin level as a whole, with the aim of preventing critical changes within the basin by any single country acting unilaterally. The principles of water resources management in the European Union include the precautionary principle, a high level of protection, preventive measures, the «polluter pays» principle, international cooperation, etc. [1, 2]. The Rhine River is a good example of compliance with these principles. It flows through nine countries and has a total length of 1,320 kilometers. The International Commission for the Protection of the Rhine (ICPR) was established to protect the Rhine. The Rhine 2020 program includes the following provisions: reducing damage by 25% by 2020; improving flood awareness and warning systems; maintaining and strengthening dams (27 hydroelectric power plants have been built along the river); and compiling flood risk maps (for spatial planners). Based on this program, «Rhine 2040» was created in February 2020 [4]. The goal of the program is to create and implement a process for managing the Rhine River basin in response to the effects of climate change. «Rhine 2040» aims to ensure the self-cleaning capacity of water, increase biodiversity, and facilitate the exchange of approaches, methods, experience, and scientific research on adaptation to climate change.

Water resources management within Ukraine's river basin is carried out in accordance with the basin management principle under the Water Code of Ukraine. To ensure effective management of the environmental safety of water resources, basin councils were established on the basis of Article 13³ of the Water Code of Ukraine [3].

The main tasks of the basin council include: providing proposals and ensuring the interests of enterprises, institutions, and organizations in the field of water use and protection, as well as taking measures to restore water resources within the sub-basin; promoting integrated water resources management within the sub-basin; to promote cooperation between central and local executive authorities, local self-government bodies, enterprises, institutions, organizations, international organizations, and experts (by agreement) to ensure the «good» ecological and chemical status of surface water bodies, the «good» chemical and quantitative status of groundwater, and the «good» ecological potential of artificial and significantly modified surface water bodies within the sub-basin [4]

To implement the basin principle of water resource management, it is important and necessary to develop a river basin management plan for each river basin separately in accordance with Article 13 of the European Union Water Framework Directive [5, 6]. In December 2023, a draft plan was developed for the Dnieper river basin for 2025–2030 [7]. Separate councils were established for the Dnieper sub-basins. Currently, the Desna and Upper Dnipro Basin Council, the Middle Dnipro Basin Council, the Lower Dnipro Basin Council, and the Pripjat Basin Council are in operation. The regulations on basin councils are approved by the State Agency of Water Resources of Ukraine. The State Agency of Water Resources of Ukraine, together with the State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, central and local executive authorities, and local self-government bodies, in accordance with Article 5 of the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 336 of May 18, 2017, «On Approval of the Procedure for Developing a River Basin Management Plan» [8], develop a river basin management plan. The document is updated no later than three years before the end of the current plan.

The aim of the study is to improve the reliability of assessing the ecological status of surface water bodies by taking into account the impact of upstream tributaries located below within the sub-basin on changes in the ecological status of Ukraine's main waterway.

During previous studies [9–10], the impact of pollutants from tributaries geographically located upstream of the main river on downstream tributaries was proven based on isolines constructed using the publicly available geographic information system software QGIS (Quantum GIS – <https://www.qgis.org/>) and a mathematical model was developed to predict changes in the ecological status of surface water bodies within the sub-basin, which allows predicting the impact of upstream tributaries on the main river downstream within the sub-basin, and take this into account when forecasting changes in

the ecological status of the main water artery, which allows it to be used when forecasting the possibility of natural and man-made emergencies and their consequences.

The basis of the proposed algorithm of management actions for the implementation of the basin principle of water resources management is an integrated approach to assessing the ecological status of a sub-basin of a surface water body by taking into account the impact of the left tributaries of the Dnieper River on the ecological status of the main water artery. The algorithm involves the following steps: collection and processing of data by each participating structure; determination of the predicted impact of upstream tributaries on the main river downstream within the sub-basin, which is a key factor in improving the assessment of the ecological status of surface water bodies; identification of pollution sources, development and implementation of measures to prevent and eliminate negative consequences. To forecast the ecological status of surface water bodies within the sub-basin, a mathematical model for forecasting their ecological status should be used, taking into account the impact of upstream tributaries on downstream tributaries, the reliability and adequacy of which has been proven by research.

When deciding on the necessary measures to respond to pollution of a downstream surface water body due to the impact of a water body located upstream, it is recommended to proceed as follows. It is assumed that, based on information about potential or existing pollution of a water body, structural units should use all available means of communication to convey information about the situation as quickly as possible to each organization involved in monitoring the environmental status of water bodies: basin water resource management authorities, territorial divisions of the State Emergency Service, the State Environmental Inspection, and local executive authorities.

The algorithm of management actions for implementing the basin principle of water resources management is presented in Figure 1.

These structures, either independently or in cooperation with another organization (the polluting enterprise), must immediately take the necessary measures to investigate and clarify the situation, eliminate the consequences, and control the situation that has arisen at the water facility. Organizations responsible for developing and monitoring the implementation of response measures, and enterprises that carry out the prescribed measures, must organize continuous monitoring of the situation in order to determine the effectiveness of the measures developed. Organizations responsible for developing and monitoring the implementation of response measures, and enterprises that carry out the instructions provided, must organize constant monitoring of the situation in order to establish

the effectiveness of the measures developed and, in accordance with the established procedure, promptly notify all interested structures with information about the environmental status of the water body, the concentrations of pollutants in it and in the enterprise's wastewater, in particular the expected concentration values from geographically higher rivers, the actions taken and their results in preventing or eliminating pollution. When MPCs are exceeded, the information is immediately forwarded to the territorial bodies of the State Emergency Service to determine the scale of the situation and assess the threat to the life of the population in a certain territory, which in turn promptly convey the information to the population and local authorities.

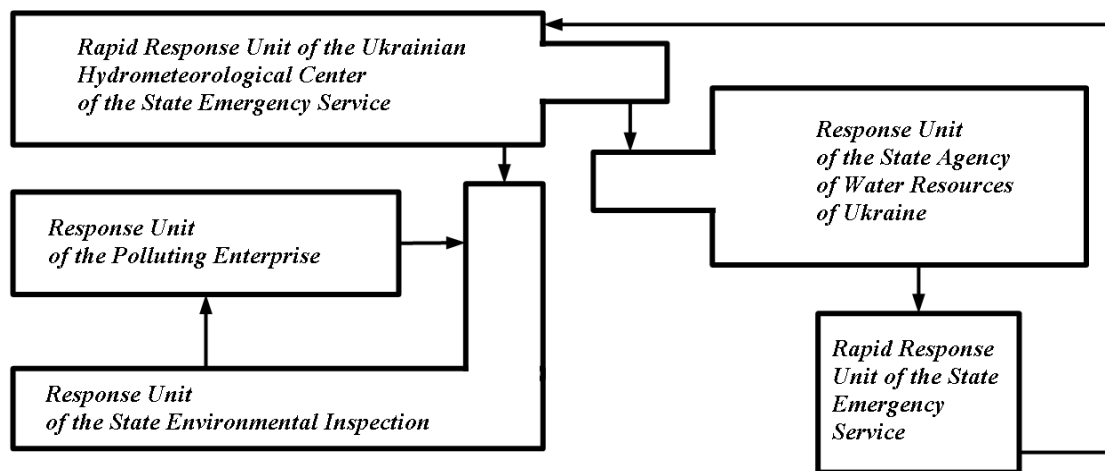


Figure 1 – Algorithm of management actions for implementing the basin principle of water resources management

Observation and control points must be combined with hydrological stations or areas that provide hydrological data. In accordance with the Regulations on the Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service of Ukraine dated April 2, 2024, the territorial body of the Ukrainian Hydrometeorological Center regularly collects and processes data on substance concentrations obtained from observation posts at water bodies. In order to improve the assessment of the ecological status of surface water bodies and to respond promptly to natural and man-made emergencies, the territorial body of the Ukrainian Hydrometeorological Center, based on the identified patterns of influence of the geographically higher left tributary of the Dnieper on the lower one due to internal flow, must regularly determine the expected value of the concentration of the substance from the higher tributary at the observation post of the lower tributary and compare it with the actual data on the concentrations of substances.

The criterion for determining the occurrence of a pollution threat is the environmental risk coefficient (K), which determines the degree of approximation of the concentration of the i-th substance to its MPC and is calculated using formula (1)

$$K = \frac{C_i}{\Gamma_{ДК_i}}, \quad (1)$$

Among the components of observations, it is essential to take into account visual monitoring of the condition of the water body. One of the most significant signs of a dangerous situation at a water body is the mass death of fish and other aquatic organisms, the release of bottom gas bubbles, the appearance of increased turbidity, foreign coloring, odor, water blooms, foam, film, and other phenomena that deviate from the normal state of the water body.

The Basin Council is the legislator for all water issues in the basin. The functions of basin councils include, in particular, considering proposals for draft river basin management plans and promoting coordinated action to improve the ecological status of sub-basins. Therefore, the proposed improvement of the methodology for identifying the main sources of deterioration of the ecological status of surface water bodies, by taking into account the mutual influence of tributaries within the sub-basin and on the ecological status of the main waterway, should be considered at a meeting of the Basin Council.

The proposed algorithm involves structures that are subordinate to various ministries. The Cabinet The proposed algorithm involves structures that are subordinate to various ministries. The Cabinet of Ministers of Ukraine is the highest executive authority in Ukraine, which exercises state administration and ensures the implementation of legislation. Therefore, a decision of the Cabinet of Ministers of Ukraine should be developed and approved, which will allow the application of the provided algorithm, with the aim of introducing management decisions aimed at reducing the negative anthropogenic load on surface water bodies for the implementation of the basin principle of water resources management.

Conclusions

Recommendations have been developed to improve the methodology for assessing the ecological status of surface water bodies, based on an algorithm of management actions, using a mathematical model to predict changes in the ecological status of the main waterway within the basin, taking into account the mutual influence of the left tributaries of the Dnipro sub-basins for rapid response to natural and man-made emergencies.

References

1. Khilchevskiy, V. K., (2021) Monitoryng vod v Ukraini: metody otsiniuvannia yakosti vody dlia riznykh tsilei u zviazku zi zminamy normatyvnoi bazy (2014-2021 rr.) [Water monitoring in Ukraine: methods of water quality assessment for various purposes due to changes in the regulatory framework (2014-2021)]. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. 3(61), 6–19. DOI: 10.17721/2306-5680.2021.3.1
2. Khilchevskiy, V. K., Zabokrytska, M. R., & Kravchynskiy, R. L. (2016). Ekolohichna standartyzatsiia ta zapobihannia vplyvu vidkhodiv na dovkillia: navch. posibnyk [Environmental standardization and prevention of waste impact on the environment: training manual]. Kyiv.
3. Vodnyi kodeks Ukrainy [Water Code of Ukraine]. 213/95-VR Law of Ukraine. (1995). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-bp#Text>.
4. Pro zatverdzhennia Typovoho polozhennia pro baseinovi rady [On approval of the Model Regulation on Basin Councils]. 23 Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (2017). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-17#Text>.
5. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy, October 23, 2000. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text.
6. Khilchevskiy, V. K., Zabokrytska, M. R., Kravchynskiy, R. L., & Chunarov, O. V. (2015). Osnovni zasady upravlinnia yakistiu vodnykh resursiv ta yikhnia okhorona: navch. posibnyk [Basic principles of water resources quality management and protection: training manual]. Kyiv.
7. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources. (2023). Plany upravlinnia richkovym baseinom Dnipra 2025–2030 [Dnipro River basin management plan for 2025–2030]. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/12/Dnipro-1.zip>.
8. Pro zatverdzhennia Poriadku rozroblennia planu upravlinnia richkovym baseinom [On approval of the Procedure for developing a river basin management plan]. 336 Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine. (2017). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/336-2017-%D0%BF#n8>.
9. Kovalenko, S. (2023). Vplyv obminu gruntovymy vodamy mizh prytokamy na ekolohichnu yakist vod poverkhnevnykh vodnykh ob'ektiv [Influence on groundwater exchange between confluents on the ecological quality of surface water bodies]. *Technogenic and ecological safety*, 14(2/2023), 98–103. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.2.10.

10. Kovalenko, S. (2024). Matematychna model prohnozuvannia zminy ekolohichnoho stanu poverkhnevyykh vodnykh ob'ektiv z urakhuvanniam vplyvu vyshcheroztashovanykh pryток [Mathematical model for predicting changes in the ecological state of surface water bodies, taking into account the impact of upstream tributaries]. *Technogenic and ecological safety*, 16(2/2024), 46–53. DOI: 10.52363/2522-1892.2024.2.7.

Лебьодкін Є. О., аспірант;

Варламов Є. М., канд. техн. наук, ст. наук. співр.;

Палагута О. А., канд. техн. наук;

Науково-дослідна установа, Український науково-дослідний інститут екологічних проблем, м. Харків, Україна

Лебьодкін О. І., керівник відділу автоматизованих систем моніторингу

Компанія Хімлаборреактив, м. Бровари, Київська область

МОДЕЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ PM_{10} У ЗИМОВИЙ ПЕРІОД У м. КРИВИЙ РІГ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ RANDOM FOREST

Анотація. У цьому дослідженні розглянуто проблему прогнозування концентрацій дрібнодисперсних частинок PM_{10} у великому промисловому центрі України – місті Кривий Ріг – протягом зимового періоду 2024–2025 рр. З використанням даних спостережень за концентрацією PM_{10} та супутніми метеорологічними параметрами (температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрям вітру) побудовано модель регресії Random Forest для короткострокового прогнозування рівнів забруднення. Додатково враховано часові чинники (час доби, день тижня) та умовну змінну, що відображає інтенсивність викидів протягом доби. Перед побудовою моделі дані були нормалізовані та очищені від крайніх викидів.

Розроблена модель пояснює приблизно 72 % варіації концентрації PM_{10} на тестовій вибірці та демонструє значне зменшення середньої абсолютної похибки ($MAE \approx 8,5$ мкг/м³) порівняно з лінійною регресією. Графічний аналіз показує, що PM_{10} має виражену добову циклічність – найнижчі рівні в денні години, а найвищі – у вечірній та нічний час. Кореляційний аналіз підтверджує негативний зв'язок між PM_{10} та температурою, швидкістю вітру та позитивний із відносною вологістю. Визначено, що найбільший внесок у пояснення варіації вносять атмосферний тиск, температура та вологість, тоді як часові змінні мають менший вплив.

Ключові слова PM_{10} ; атмосферне повітря; прогнозування; метеорологічні чинники; машинне навчання; Random Forest; Кривий Ріг.

Вступ

Охорона атмосферного повітря є одним із ключових напрямів сучасної екологічної політики. Дрібнодисперсні частинки PM_{10} (аеродинамічний діаметр до 10

мкм) проникають у дихальні шляхи людини та асоціюються з підвищеним ризиком хронічних хвороб серцево-судинної та дихальної систем, а також передчасною смертністю [1]. Європейські та світові стандарти якості повітря будуються саме на граничних концентраціях PM_{10} та $PM_{2.5}$ [2]. З прийняттям нової Директиви (ЄС) 2024/2881 про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи, що набрала чинності 10 грудня 2024 р., Європейський Союз посилює вимоги до моніторингу та прогнозування забруднення. І хоча Україна тільки інтегрує ці вимоги у своє законодавство, актуальність оперативного прогнозу якості повітря в промислових містах є очевидною.

Кривий Ріг – один із найбільших промислових центрів України, де зосереджені металургійні комбінати, видобувні підприємства та значна транспортна інфраструктура. Викиди промисловості та транспорту разом із несприятливими метеорологічними умовами створюють умови для підвищених концентрацій твердих частинок, особливо в зимовий період. Традиційні методи прогнозування, такі як множинна лінійна регресія, часто виявляються недостатніми для відтворення складних нелінійних зв'язків між погодними факторами та забрудненням. Сучасні підходи машинного навчання, зокрема ансамблеві методи, мають потенціал покращити точність прогнозу, оскільки дозволяють виявляти приховані закономірності, недосяжні для лінійних моделей [3]. Random Forest – один із найпопулярніших ансамблевих методів машинного навчання. Він поєднує велику кількість дерев рішень, кожне з яких навчається на випадковій підмножині даних та ознак. Підсумковий прогноз отримують шляхом усереднення результатів окремих алгоритмів розгалуження даних (для регресії) або голосування (для класифікації) [3]. Такий підхід суттєво зменшує перенавчання, підвищує стійкість до шумів та забезпечує оцінку важливості кожної ознаки у моделі. Окремі дослідження показують, що моделі Random Forest здатні пояснити понад половину варіацій PM_{10} , використовуючи сукупність метеорологічних та часових факторів.

Мета даної роботи – побудувати та оцінити модель Random Forest для прогнозування концентрацій PM_{10} у місті Кривий Ріг у зимовий період. Робота базується на реальних даних сертифікованої в Україні станції спостережень «Cairnet» компанії ENVEA, що охоплюють період з грудня 2024 р. включно по березень 2025 р. Отримані результати порівнюються з висновками попередньої роботи, в якій застосовувалася множинна лінійна регресія. Докладний аналіз впливу

метеорологічних умов і часових змінних дозволяє запропонувати рекомендації щодо управління якістю повітря на місцевому рівні.

Матеріали та методи

Для аналізу використано набір даних, отриманий зі станції моніторингу якості повітря Cairnet, що встановлена у центральній частині м. Кривий Ріг. Станція сертифікована для контролю PM_{10} відповідно до державних стандартів, а також укомплектована метеорологічними датчиками. Вхідний файл містить 9220 вимірювань за період з 5 грудня 2024 р. по 31 березня 2025 р. Кожен запис характеризується такими показниками:

- **PM_{10} , $мкг/м^3$** – концентрація дрібнодисперсних частинок;
- **T, °C** – температура повітря на момент вимірювання;
- **RH, %** – відносна вологість;
- **P, мм рт. ст.** – барометричний (атмосферний) тиск;
- **SW, градуси** – швидкість вітру;
- **DW, м/с** – напрям вітру;
- **Data_Time** – мітка часу (дата та точний час спостереження).

Перед початком моделювання у таблицю було додано низку часових змінних, що відображають циклічну добову та тижневу динаміку:

- **Час доби** – категоріальна змінна з чотирма значеннями: ніч (0:00–06:00), ранок (06:00–12:00), день (12:00–18:00) та вечір (18:00–24:00). Такий поділ дозволяє врахувати зміну стабільності атмосфери, наявність інверсій та зміну активності джерел викидів;

- **Тип дня** – бінарна змінна (0 – робочий день, 1 – вихідний), що відображає зменшення транспортної та виробничої активності у вихідні;

- **Інтенсивність викидів** – числова змінна, що відповідає умовному рівню антропогенного навантаження протягом доби. Для ночі прийнято значення 1,00; ранку – 1,75; дня – 1,55; вечора – 2,15. Вибір коефіцієнтів ґрунтується на типових добових циклах активності у великих містах: максимум викидів припадає на вечірні години, мінімум – уночі.

Для виключення екстремальних сплесків, що пов'язані з аварійними ситуаціями або сильними пиловими бурями, із вибірки було вилучено 5 % найвищих значень PM_{10} (понад 95-й перцентиль). Це дозволило зосередитися на нормальних умовах забруднення й уникнути сильного впливу викидів на навчання моделі.

Підготовка даних

- Обробка дат і часових ознак. Стовець Data_Time перетворено на тип datetime. З нього виділено годину та день тижня, на основі яких сформовано змінні «час доби» та «тип дня». Категоріальні значення закодовано методом бінарне кодування: Для кожного періоду доби сформовано окремі бінарні змінні (tod_night, tod_morning, tod_day, tod_evening), які набувають значення 1 у випадку належності спостереження до відповідної категорії та 0 – в іншому випадку..

- Нормалізація та заповнення пропусків. У числових ознак (T, RH, P, SW, DW, type_day, emission_intensity) траплялися пропуски, які було заповнено медіанним значенням відповідної ознаки на навчальній вибірці (метод Median Imputation). Після цього всі числові ознаки масштабовано до нульового середнього та одиничного стандартного відхилення за допомогою стандартного нормування (StandardScaler).

- Розділення на навчальну та тестову вибірки. Дані поділено у співвідношенні 70:30. Для забезпечення об'єктивної оцінки моделі дані змішано випадковим чином із фіксованим параметром random_state.

- Побудова моделі. Для прогнозування обрано Random Forest Regressor з 200 деревами рішень. Така кількість дерев забезпечує баланс між точністю прогнозу та швидкістю обчислень. Оптимізація гіперпараметрів (глибина дерев, мінімальний розмір листа) виконувалась експериментально з використанням крос-перевірки.

- Оцінка якості. Якість моделі оцінювали за метриками середньої абсолютної похибки (MAE), середньоквадратичної похибки (RMSE) та коефіцієнта детермінації R^2 на навчальній і тестовій вибірках. Крім того, виконано графічний аналіз: побудовано діаграми «факт – прогноз» та графік залишків (різниця між фактичними та прогнозованими значеннями).

Алгоритм Random Forest

Random Forest належить до ансамблевих методів **bagging**, у яких комбінування багатьох слабких моделей (дерев рішень) створює сильний узагальнюючий предиктор. Ключові особливості алгоритму[3]:

- Кожне дерево навчається на випадковій підвибірці навчальних даних, отриманій методом бутстреп (вибірка з поверненням). Це зменшує кореляцію між окремими деревами.

- Для кожного вузла дерева при виборі оптимального поділу розглядається випадкова підмножина ознак. Такий підхід запобігає домінуванню однієї сильної ознаки та підвищує різноманіття дерев.

- Для задач регресії підсумковий прогноз обчислюється як середнє арифметичне прогнозів усіх дерев. Для задач класифікації використовується більшість голосів (majority vote).

Завдяки паралельному навчанню дерев та усередненню результатів Random Forest демонструє високу стійкість до переобучення та шумів у даних. Метод дозволяє оцінити важливість ознак, що корисно для інтерпретації моделей екологічних процесів. У дослідженні, присвяченому нормалізації PM_{10} в Австралії, найкраща модель

Random Forest пояснила близько 59 % варіацій концентрації PM_{10} , використовуючи метеорологічні та часові фактори [3]. Це мотивує використання аналогічного підходу для українських умов. Загальний вигляд моделі:

$$f(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B f_b(x);$$

де:

B - кількість дерев у моделі;

$f_b(x)$ - прогноз b -го дерева;

$f(x)$ - узагальнений прогноз Random Forest.

Результати

Для розуміння добової динаміки PM_{10} проаналізовано розподіли концентрацій залежно від часу доби (рис. 1). На графіку показано, як змінюється концентрація PM_{10} залежно від часу доби - вночі, вранці, вдень та ввечері. Середня лінія всередині прямокутника відображає медіану - типові значення. Сам прямокутник охоплює половину всіх даних. Вертикальні лінії, що виходять угору та вниз від прямокутника, показують діапазон нормальних значень. Окремі точки вище верхньої межі чи нижче нижньої межі - це рідкісні випадки, коли концентрації значно відхилялися від звичайних, наприклад під час смогу чи пилових бур. Таким чином:

- Ніч (00:00–06:00). Медіанне значення PM_{10} становить ~ 33 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$. Дані характеризуються широким розкидом; верхній кuartиль сягає ~ 54 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$. Високі значення (>80 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$) трапляються рідко, але саме вночі фіксуються найвищі піки (до 120 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$). Підвищення забруднення пов'язане зі слабким перемішуванням повітря та наземними інверсіями.

- Ранок (06:00–12:00). Розподіл схожий на нічний, але верхня межа дещо коротша. Медіана близько 35 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$, верхній кuartиль ~ 53 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$. Ранкові піки зумовлені підвищенням транспортної активності та накопиченням забруднювачів після

нічної інверсії.

- День (12:00–18:00). Найнижчі концентрації: медіана ≈ 27 мкг/м^3 , верхній кuartиль ≈ 39 мкг/м^3 . Під час денного прогрівання атмосфера стає турбулентною, відбувається активне вертикальне перемішування і розсіювання частинок, що пояснює зниження забруднення.

- Вечір (18:00–24:00). Рівень PM_{10} зростає: медіана ≈ 33 мкг/м^3 , IQR (середній діапазон значень) ≈ 22 – 51 мкг/м^3 . Вечірній максимум відображає пікові навантаження транспорту, побутових джерел та зменшення висоти змішування вночі

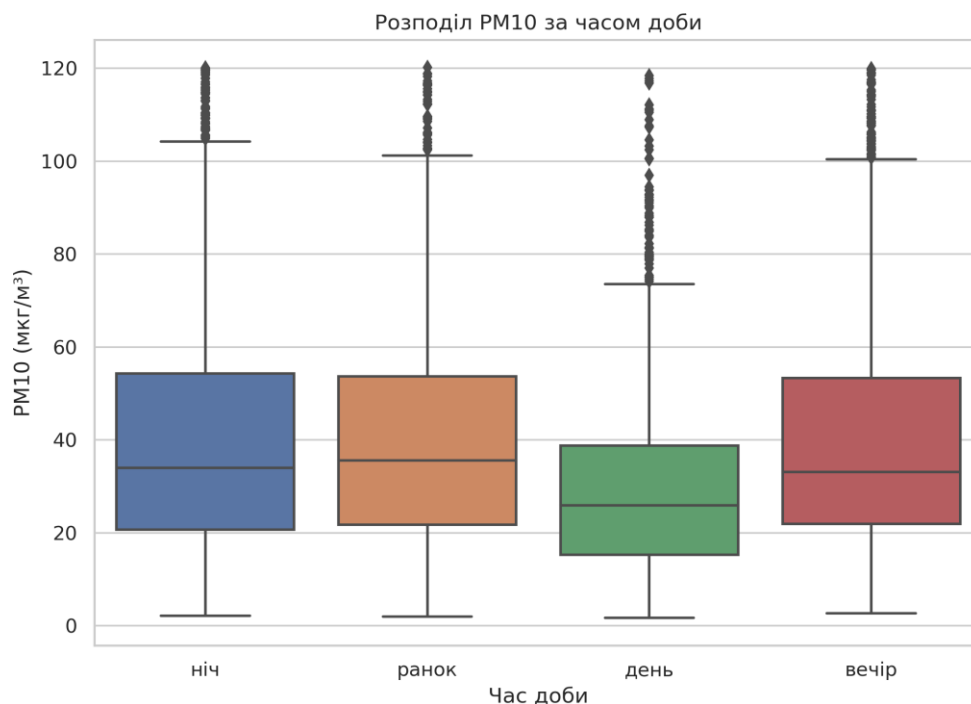


Рисунок 1 – Розподіл концентрацій PM_{10} для різних періодів доби. Рамкові діаграми показують медіани, кuartили та аномальні значення

Таким чином, добовий цикл характеризується мінімумом у денний час і максимумом у нічні та вечірні години. Це відповідає фізичним процесам турбулентності та добовій активності джерел.

Розподіл PM_{10} залежно від рівня умовної інтенсивності викидів наведено на рис. 2.

Порівняння груп підтверджує очікувану тенденцію: при найнижчій інтенсивності (1,00) медіана PM_{10} становить ~ 33 мкг/м^3 ; під час денного та ранкового періодів (1,55–1,75) медіани близькі до 27–35 мкг/м^3 , а у вечірні години (2,15) спостерігається помітне зростання до ~ 33 – 36 мкг/м^3 . Розподіли частково перекриваються, проте найвищі відхилення значень угору фіксуються саме для вечірнього та нічного часу, що свідчить

про вплив не лише антропогенних джерел, а й метеорологічних умов. Кореляція між PM_{10} та метеорологічними змінними

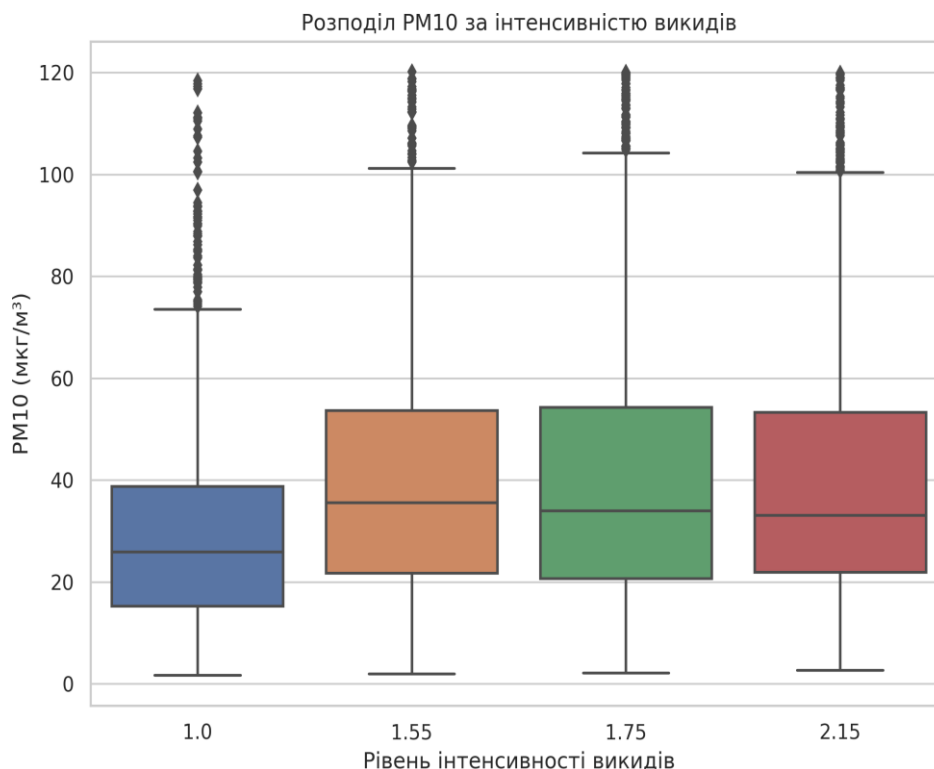


Рисунок 2 – Розподіл концентрацій PM_{10} для чотирьох рівнів інтенсивності викидів (1,00 – ніч; 1,55 – день; 1,75 – ранок; 2,15 – вечір).

Після відсікання 5 % найбільших значень PM_{10} було розраховано коефіцієнти лінійної кореляції між PM_{10} та незалежними ознаками. Найсуттєвіші зв'язки такі:

- Відносна вологість (RH): $r \approx 0,35$. Зростання вологості сприяє злипанню частинок та тривалішому перебуванню аерозолі у приземному шарі. Висока вологість часто супроводжується туманами та штилями, що сповільнюють розсіювання.
- Температура повітря (T): $r \approx -0,21$. Із підвищенням температури повітря концентрації PM_{10} зменшуються завдяки збільшенню висоти змішування та посиленню конвективних потоків. Похолодання, навпаки, сприяє накопиченню пилу.
- Напрямок вітру (DW): $r \approx -0,19$. Хоча у моделі напрям вітру представлено числовим значенням, цей зв'язок відображає переважання певних напрямків під час стійкої погоди. Оскільки напрямок є циклічною змінною, лінійна кореляція є умовною.
- Атмосферний тиск (P): $r \approx 0,08$. Спостерігається слабкий позитивний зв'язок. Високий тиск часто асоціюється зі спокійною погодою та температурними інверсіями, що сприяє акумуляції забруднювачів.

Інші фактори (швидкість вітру, тип дня, інтенсивність викидів) мають низьку лінійну кореляцію, але їхній вплив проявляється у нелінійних взаємодіях, які лінійна кореляція не відображає. Це ще раз підтверджує доцільність застосування нелінійних моделей.

Показники якості моделі Random Forest

Модель Random Forest була навчена на 6 117 спостереженнях (70 %) і перевірена на

2 622 спостереженнях (30 %). Результати оцінювання подано у таблиці 1.

Таблиця 1 – Показники точності моделі Random Forest (MAE – середня абсолютна похибка; RMSE – корінь середньоквадратичної похибки; R^2 – коефіцієнт детермінації).

Вибірка	MAE, мкг /м ³	RMSE, мкг/м ³	R^2
Навчальна	3,25	4,78	0,96
Тестова	8,51	12,63	0,72

Високе значення R^2 (0,96) на навчальній вибірці свідчить про здатність моделі майже ідеально відтворювати вихідні дані. На тестовій вибірці модель пояснює 72 % варіації PM_{10} , що значно перевищує результат лінійної регресії (≈ 27 %). Середня абсолютна похибка зросла з 3,25 до 8,5 мкг/м³. Це закономірно, оскільки на тренувальних даних модель відтворює вже відомі їй приклади й помиляється менше, тоді як на тестових даних вона стикається з новими умовами (іншими поєднаннями метеорологічних факторів та впливом додаткових джерел забруднення), що природно призводить до зростання похибки. Таким чином, більша похибка на незалежних даних відображає реальну здатність моделі до узагальнення. Однак навіть із такою похибкою модель залишається придатною для оцінки загального рівня забруднення й раннього попередження про перевищення нормативів.

Графічний аналіз прогнозів та залишків.

На рис. 3 зображено співвідношення між прогнозованими та фактичними значеннями PM_{10} для навчальної та тестової вибірок. Штрихова лінія показує ідеальну відповідність ($y=x$)

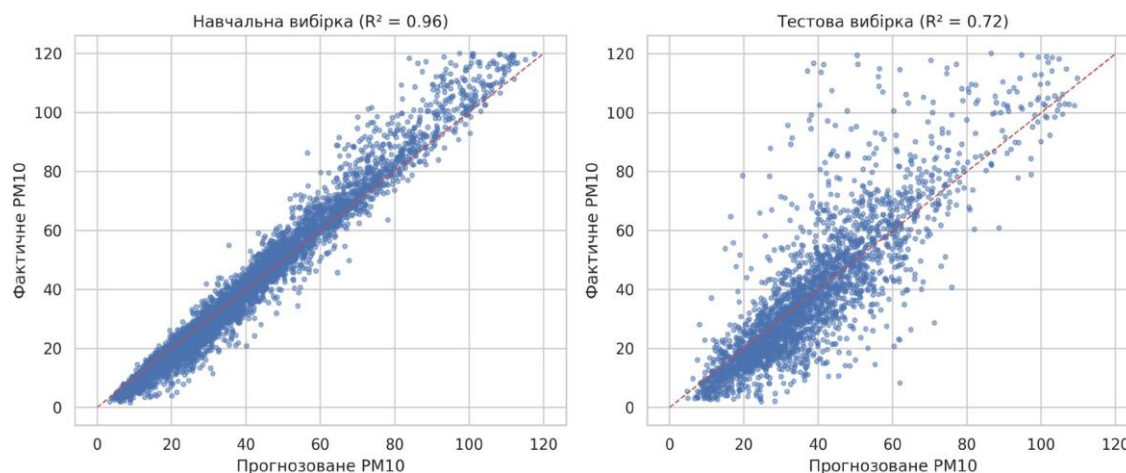


Рисунок 3 – Співвідношення фактичних та прогнозованих значень PM_{10} . Ліворуч – навчальна вибірка ($R^2=0,96$); праворуч – тестова вибірка ($R^2=0,72$).

На навчальній вибірці модель майже точно відтворює спостережені значення, що є природним результатом використання великої кількості алгоритмів, об'єднаних у єдину систему. На тестових даних розсіювання навколо діагоналі помітно більше, однак більшість точок концентруються поблизу лінії ідеальної відповідності. Модель дещо недооцінює високі концентрації (>80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), але загалом відтворює амплітуду коливань. Це свідчить про добру узагальнювальну здатність Random Forest щодо метеорологічних і часових факторів.

Для виявлення систематичних помилок побудовано графік залишків (фактичне значення мінус прогноз) у залежності від прогнозу (рис. 4).

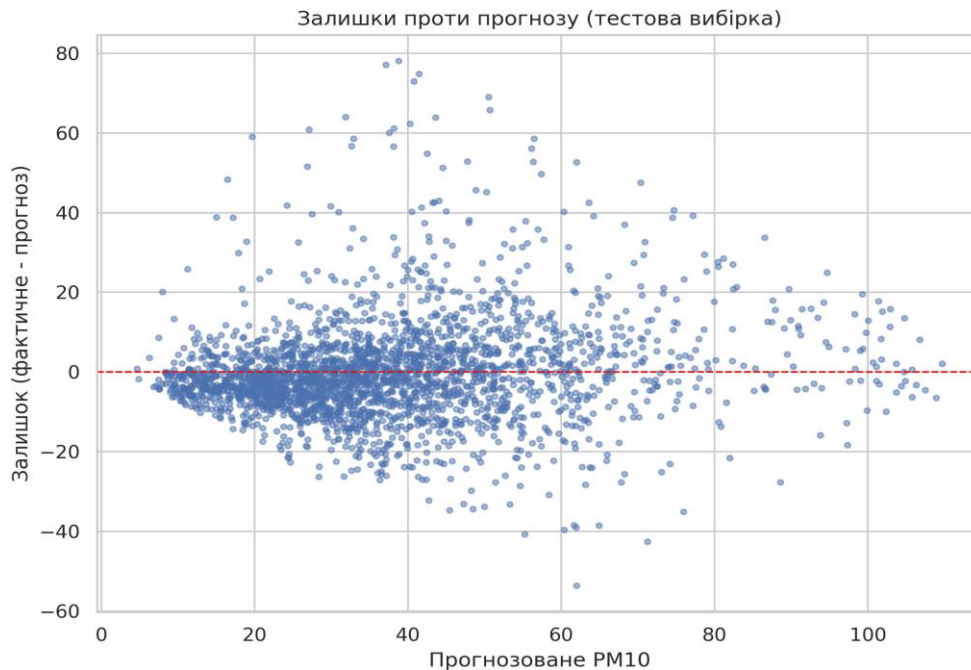


Рисунок 4 – Залишки (фактичне – прогнозоване) у залежності від прогнозованих значень PM_{10} на тестовій вибірці. Штрих лінія $y=0$ позначає ідеальний прогноз.

Графік демонструє, що залишки в середньому розподілені симетрично навколо нуля. У діапазоні прогнозів 0–40 $мкг/м^3$ спостерігається незначне заниження моделі – фактичні значення іноді вищі на 5–20 $мкг/м^3$. Це пояснюється впливом не врахованих факторів (наприклад, локальних джерел пилу або інверсій). При середніх прогнозах (40–70 $мкг/м^3$) залишки мають мінімальний розкид, що вказує на найкращу роботу моделі саме у цьому діапазоні. Для високих прогнозів (>70 $мкг/м^3$) з'являються як від'ємні, так і додатні залишки, але явних систематичних зсувів не спостерігається. Таким чином, Random Forest добре справляється з нелінійними взаємодіями, хоча деякі пікові випадки залишаються непередбачуваними.

Важливість ознак

Оцінка важливості ознак проводилася на основі відносного зниження середньої похибки при розщепленні дерев. На рис. 5 подано ранжування ознак.

Найбільший вклад у точність моделі вносять такі фактори:

- Атмосферний тиск (P), температура (T) та відносна вологість (RH) – кожна з цих змінних становить понад 25 % сумарної важливості. Це підтверджує, що синоптичні умови визначають рівень PM_{10} : підвищений тиск і низькі температури сприяють акумуляції частинок, а висока вологість посилює їхнє осідання та

агрегування.

- Швидкість вітру (SW) – близько 8 % важливості. Помірний вітер сприяє розсіюванню аерозолів, але водночас може переносити пил із джерел на метеостанцію.

- Тип дня (type_day) та напрям вітру (DW) – по 3–4 % важливості. Вихідні дні характеризуються дещо нижчими рівнями PM_{10} через зниження транспортної активності. Напрямок вітру відіграє меншу роль, ймовірно через циклічну природу змінної.

- Інтенсивність викидів і категорії часу доби мають порівняно невелику важливість (1–2 % кожна). Це пояснюється тим, що ці змінні частково корелюють із метеорологічними характеристиками та не додають суттєвої нової інформації для моделі.

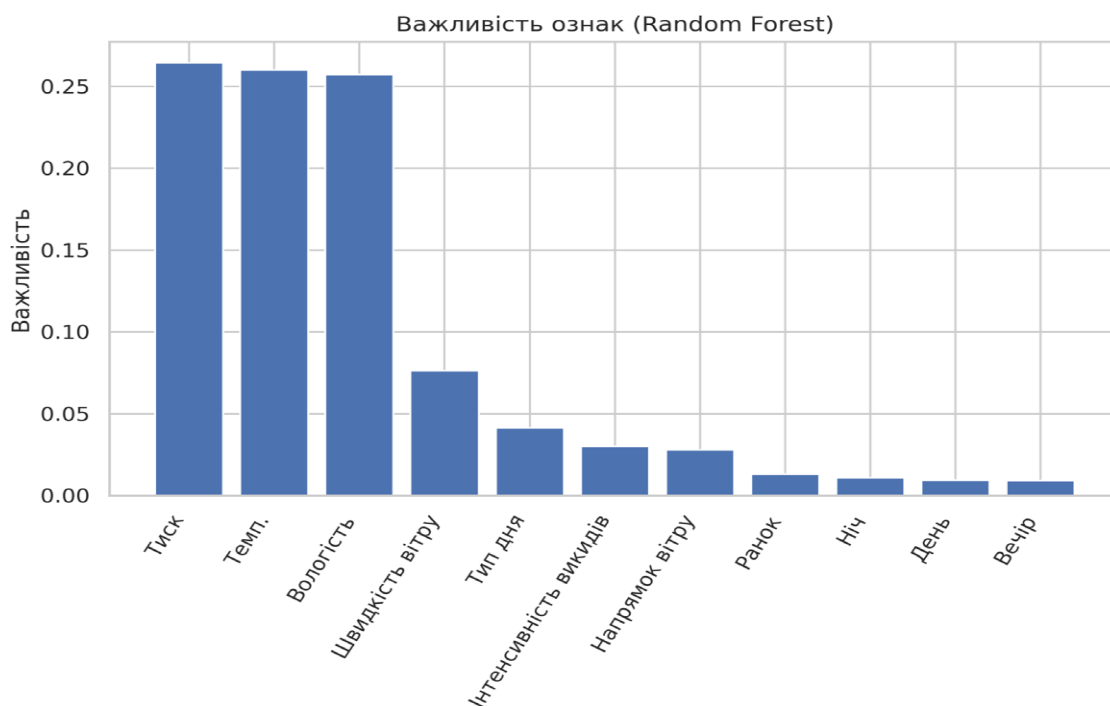


Рисунок 5 – Важливість незалежних змінних у моделі Random Forest. Висота стовпця пропорційна впливу ознаки на точність прогнозу.

Обговорення

Порівняно з моделлю множинної лінійної регресії, яка пояснювала лише 27 % варіації PM_{10} , модель Random Forest значно покращила точність прогнозу. Такий приріст обумовлений здатністю ансамблевого підходу відтворювати нелінійні зв'язки між метеорологічними умовами, часом доби та концентраціями забруднювачів. Лінійні моделі припускають сталий коефіцієнт впливу кожної змінної, але взаємодія факторів (наприклад, висока вологість при низькій температурі) має складніший характер.

Random Forest, навчаючи численні дерева на випадкових підвбірках, автоматично враховує такі взаємодії, що підвищує здатність узагальнення. Крім того, ансамблевий метод краще передбачає пікові значення, хоча певне заниження при дуже високих рівнях все ж зберігається.

Вплив метеорологічних умов

Отримані результати підтверджують, що основними регуляторами рівня PM_{10} у Кривому Розі взимку є температура, атмосферний тиск і відносна вологість. Високий тиск у поєднанні з низькими температурами часто відповідає антициклонним умовам, які формують приземні інверсії та зменшують висоту змішування. Це призводить до накопичення частинок у нижньому шарі атмосфери. Висока вологість може підсилювати утримання пилу завдяки конденсації на аерозолях, а також призводити до туманів, які обмежують вертикальне перемішування. Швидкість вітру відіграє подвійне значення: помірний вітер сприяє розсіюванню забруднення, але сильний може переносити пил із відкритих кар'єрів або промислових майданчиків. Температурний чинник має нелінійний характер впливу. При невеликих морозах ($<0^{\circ}C$) концентрації PM_{10} підвищуються через низьку висоту конвективного шару. Однак при ще більш низьких температурах пил може сильніше осідати або замерзати, що зменшує масову концентрацію. Random Forest успішно враховує такі нелінійні ефекти, чого не можна досягти за допомогою простих лінійних моделей.

Часові закономірності та інтенсивність викидів

Добова структура PM_{10} , виявлена за допомогою розподільчих діаграм, узгоджується з характерними змінами атмосферної стабільності. Мінімум забруднення фіксується вдень, коли поверхня землі добре прогрівається й формується розвинутий конвективний шар.

Увечері та вночі спостерігається стабілізація атмосфери, приземні інверсії та накопичення пилу. Ранкові концентрації відносно високі через активізацію транспорту й промислових джерел. Змінна «інтенсивність викидів» лише частково описує ці цикли, тому її важливість для моделі є помірною.

Зміна PM_{10} залежно від дня тижня виявилася незначною, що свідчить про домінування природних процесів та цілодобової роботи промислових підприємств. Однак невелике зниження концентрацій у вихідні підтверджує зменшення транспортного потоку та побутових джерел. Для більш детального врахування

людської активності доцільно включити дані про інтенсивність руху на ключових магістралях або виробничі графіки підприємств.

Обмеження та можливості для подальших досліджень

Не зважаючи на значне покращення прогнозу, модель Random Forest має певні обмеження:

- Обмежений набір факторів. У вибірці відсутні дані про кількість транспортних засобів, масивні викиди підприємств, опади (дощ, сніг), висоту граничного шару. Включення таких змінних може істотно збільшити точність прогнозу.
- Обробка циклічних змінних. Напрямок вітру подано у градусах від 0 до 360. Лінійне представлення не враховує циклічності ($0^\circ \approx 360^\circ$). Для кращого опису слід використовувати перетворення через синус і косинус. Аналогічно, час доби можна кодувати за допомогою тригонометричних функцій.
- Довгострокове прогнозування. Дана модель призначена для короткострокового прогнозу (1–3 години). Для довгострокових прогнозів доцільно застосовувати рекурентні нейронні мережі, що враховують часову залежність між спостереженнями.
- Інтерпретація нелінійних моделей. Хоча Random Forest забезпечує оцінку важливості ознак, інтерпретація конкретних залежностей залишається складною. Частково цю проблему вирішують методи SHAP або partial dependence plots, які аналізують внесок кожного фактора в прогноз, проте вони не входили до обсягу даної роботи.

Подальше дослідження може включати комбінування моделей (наприклад, градієнтний бустинг, екстремальні випадкові алгоритми), використання даних про перевалочні майданчики, трафік, опади, а також застосування багатомодальних підходів (спутникові знімки, дані з мережі спостережних станцій).

Висновки

- Дані та методи. На основі понад 9000 вимірювань концентрацій PM_{10} та метеорологічних параметрів у Кривому Розі за зимовий період 2024–2025 рр. було сформовано навчальну та тестову вибірки. Додані часові змінні дозволили врахувати добову циклічність і зниження активності у вихідні.
- Розподіли та кореляції. Розподіл PM_{10} виявив чітку добову динаміку: найнижчі концентрації спостерігаються вдень, найвищі – уночі та ввечері. Позитивна кореляція

із вологістю та негативна з температурою підтверджують залежність забруднення від синоптичних умов.

- Модель Random Forest. Побудований алгоритм забезпечує $R^2 \approx 0,72$ на тестовій вибірці та істотно знижує похибки прогнозу порівняно з лінійною регресією. Модель адекватно відтворює розподіл PM_{10} у діапазоні 0–100 мкг/м³ і лише частково недооцінює пікові значення.

- Важливість ознак. Найбільший вплив на рівні PM_{10} мають атмосферний тиск, температура та вологість. Часові змінні та інтенсивність викидів відіграють допоміжну роль. Це свідчить про те, що режими погоди є визначальними для якості повітря в зимовий період.

- Практичні рекомендації. Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування для оперативного прогнозу та попередження населення про високі концентрації PM_{10} . Запропонована модель застосована як основа для сценарного аналізу та планування заходів із зменшення викидів.

- Узагальнюючи, застосування моделі Random Forest до реальних даних моніторингу показало високу ефективність цього підходу для прогнозування рівнів PM_{10} у промислових містах. Надалі доцільно розширювати набір ознак, використовувати комбіновані методи та інтегрувати результати у системи екологічного менеджменту.

Література

1. European Environment Agency. What is particulate matter and what are its effects on *human health*? FAQ, ред. 20 серпня 2025 р. – [Офіційний вебсайт ЄС] [L55-L74].
2. European Environment Agency. *What is particulate matter and what are its effects on human health*? FAQ, ред. 20 серпня 2025 р. – [Офіційний вебсайт ЄС] [L60-L74].
3. Random Forest Algorithm in Machine Learning. GeeksforGeeks, 2025 р. – Опис принципів роботи, переваг та ключових особливостей Random Forest [L80-L110].

Ленцов І. А., канд. техн. наук, доц.;

Хлєстов Г. І.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА У МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ: АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ ЦІЛЬОВИХ ЗАХОДІВ

Загальна постановка проблеми та її актуальність. Металургійна промисловість залишається значним джерелом техногенного навантаження на довкілля, викидаючи в атмосферу, воду та ґрунт різноманітні забруднювачі, включаючи вуглекислий газ (CO_2), тверді частинки, оксиди сірки та азоту, а також важкі метали. Виробництво сталі, зокрема, відповідає за близько 8% світових викидів CO_2 , а технологічна залежність від вугілля становить до 75% паливного балансу [1]. Однак, традиційні методи моніторингу, що базуються на періодичному зборі проб, є трудомісткими та не забезпечують даних у реальному часі. Це унеможливляє виявлення складних, неочевидних залежностей між виробничими процесами та екологічними наслідками, що перешкоджає розробці ефективних цільових заходів. Таким чином, існує нагальна потреба у впровадженні інноваційних систем, здатних вирішити ці проблеми.

Метою роботи є обґрунтування та розробка методології застосування штучного інтелекту для динамічного моніторингу, прогнозування та виявлення критичних джерел забруднення в металургії. Це передбачає: аналіз очевидних і прихованих кореляцій між виробничими, екологічними та зовнішніми даними; визначення ключових факторів, що впливають на екологічну безпеку; формулювання цільових, завчасних заходів для мінімізації впливу на довкілля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Традиційні підходи до екологічного моніторингу, засновані на ручному зборі проб та лабораторному аналізі, є повільними, трудомісткими та схильними до людських помилок. Вони не надають даних у реальному часі, що робить управління екологічними ризиками реактивним, а не проактивним. Ключовим недоліком є нездатність цих систем виявляти складні, нелінійні кореляції між виробничими процесами та показниками забруднення. Навіть системи безперервного моніторингу викидів (CEMS), що працюють у реальному часі,

часто не можуть пояснити причини виникнення аномалій, оскільки не інтегровані з даними виробничих процесів. Це створює критичний інформаційний розрив, який може бути вирішений лише за допомогою технологій здатних обробляти масивні та різномірні набори даних.

Для ілюстрації цих обмежень та демонстрації переваг, які надають ШІ-орієнтовані системи, було розроблено порівняльну таблицю (табл. 1). Вона наочно демонструє перехід від застарілих, обмежених методів до комплексних, динамічних систем, що дозволяють вирішити раніше нерозв'язані проблеми, пов'язані з аналізом великих обсягів даних, прогнозуванням та автоматизацією процесів металургії.

Таблиця 1 — Порівняння традиційних та ШІ-орієнтованих систем екологічного моніторингу

Параметр порівняння	Традиційна система	ШІ-орієнтована система
Сенсорна основа	Ручний збір зразків, стаціонарні датчики	Мережі сенсорів IoT, дистанційне зондування (супутники, БПЛА)
Режим даних	Періодичний, відкладений	Реального часу
Обсяг та різномірність даних	Обмежений, локальний	Масивний, мультимодальний (виробничі, екологічні, зовнішні)
Можливість аналізу	Базовий, статистичний	Кореляційний, прогнозувальний, аналіз аномалій
Характер управління	Реактивний (після інциденту)	Проактивний, превентивний (до інциденту)
Схильність до помилок	Висока (людський фактор, транспортування)	Мінімальна (автоматизація, алгоритми валідації)
Вартість	Високі постійні витрати (персонал, лабораторні аналізи)	Високі початкові інвестиції з потенційним швидким поверненням

Таким чином, ключовим невирішеним завданням є інтеграція та аналіз різномірних даних — від виробничих показників до екологічних параметрів — за допомогою технологій штучного інтелекту. Це дозволить ідентифікувати приховані

залежності, прогнозувати екологічні ризики та розробляти цільові, економічно обґрунтовані заходи для забезпечення сталого розвитку галузі.

Ефективність застосування ШІ залежить від наявності масивних та різномірних даних, що збираються в реальному часі. Для цього пропонується гібридна інтегрована система, яка поєднує: мережі сенсорів Інтернету речей (IoT) для збору даних про виробничі та екологічні параметри безпосередньо на об'єктах [2]; та технології дистанційного зондування (ДЗ) — супутники (наприклад, TROPOMI) для широкомасштабного моніторингу забруднення повітря (NO₂, PM_{2.5}) та БПЛА для деталізованого моніторингу важкодоступних місць [3]. Система ШІ на цьому етапі допомагає виявляти прогалини та невідповідності в даних, забезпечуючи їх високу якість для подальшого аналізу.

Штучний інтелект (ШІ) є ключовим інструментом для перетворення масивних та різномірних даних, зібраних гібридними системами, на дієві висновки. Методи машинного (ML) та глибокого навчання (DL) здатні виявляти складні нелінійні кореляції між виробничими процесами та екологічними показниками. Для прогнозування вмісту важких металів у ґрунті ефективні регресійні моделі, такі як Random Forest та Principal Component Regression (PCR). Для аналізу часових рядів забруднювачів повітря, наприклад, NO_x, використовуються нейронні мережі Long Short-Term Memory (LSTM) та Recurrent Neural Networks (RNN) [4]. ШІ-моделі [5] навчаються на наборах даних, що включають виробничі параметри (енергоспоживання), екологічні показники (концентрації газів, важких металів) та зовнішні фактори (погодні умови). Це дозволяє виявляти неочевидні залежності, наприклад, що викиди пов'язані з конкретним типом сталі або режимом роботи обладнання.

Для забезпечення довіри до результатів ШІ використовуються інструменти, такі як SHapley Additive exPlanations (SHAP), які пояснюють, чому модель зробила те чи інше передбачення, роблячи її висновки доступними для неспеціалістів. Для візуалізації центральної ідеї кореляційного аналізу, що здійснюється ШІ, було розроблено дві концептуальні таблиці (табл. 1, табл. 2), які демонструють, як ШІ систематизує та аналізує дані для ідентифікації критичних джерел забруднення.

Таблиця 2 — Ключові фактори забруднення у металургії та відповідні показники моніторингу

Ключовий фактор	Показник моніторингу (виробничий)	Показник моніторингу (екологічний)	Корелюючий забруднювач
Енергоспоживання	Кількість кВт·год/т продукції	Рівень CO ₂ в атмосфері	CO ₂ , SO ₂ , NO _x
Склад сировини	Тип і якість вугілля, руди, флюсів	Вміст сірки та важких металів у відходах	SO ₂ , важкі метали, пил
Технологічні процеси	Температура печі, швидкість продувки киснем	Концентрація NO _x та CO ₂ у димових газах	NO _x , CO ₂ , тверді частинки
Управління відходами	Обсяг шлаку, шламів	Вміст токсичних речовин у ґрунті та воді	Важкі метали (Pb, Cd, Zn, As)
Обслуговування обладнання	Дані вібрації, температури агрегатів	Аварійні викиди газів та пилу	PM ₁₀ , SO ₂ , NO _x

Нижче представлена таблиця 3, яка є концептуальною матрицею, розробленою для візуалізації центральної ідеї кореляційного аналізу, який здійснюється штучним інтелектом. Вона не містить конкретних числових даних, а демонструє, як ШІ систематизує та аналізує взаємозв'язки між різними виробничими факторами та їхнім впливом на довкілля.

Таблиця 3 — Кореляційний аналіз: зв'язок між виробничими параметрами та екологічними наслідками (концептуальна матриця)

Зв'язок	Температура печі	Кількість відходів	Швидкість процесу	Тип сировини
Рівень NO _x у повітрі	Позитивна	Низька	Позитивна	Негативна (залежить від типу)
Вміст важких металів у воді	Низька	Позитивна	Низька	Позитивна (залежить від типу)
Викиди PM _{2.5}	Позитивна	Низька	Позитивна	Позитивна (залежить від типу)
Енергоспоживання	Позитивна	Негативна	Позитивна	Позитивна

Стовпці («Температура печі», «Кількість відходів», «Швидкість процесу», «Тип сировини») представляють собою ключові виробничі параметри. Рядки («Рівень NOx у повітрі», «Вміст важких металів у воді», «Викиди PM_{2.5}», «Енергоспоживання») відображають екологічні показники та операційні метрики. Значення в клітинках («Позитивна», «Негативна», «Низька») показують характер взаємозв'язку між параметром і наслідком. Наприклад, «позитивна» кореляція означає, що збільшення виробничого параметра (наприклад, температури печі або швидкості процесу) веде до збільшення екологічного наслідку (наприклад, викидів NOx або PM_{2.5}), а «негативна» кореляція вказує на зворотну залежність (наприклад, збільшення енергоспоживання може корелювати зі зменшенням певних видів відходів, якщо процес стає більш ефективним). «Низька» кореляція говорить про те, що зв'язок між цими двома факторами незначний або відсутній.

Розробка цільових заходів на основі отриманих даних. Результати кореляційного аналізу, проведеного ШІ, є основою для проактивних та економічно ефективних заходів:

1. Прогнозувальне технічне обслуговування (ПТО): ШІ-алгоритми аналізують дані сенсорів для точного прогнозування поломок, що запобігає непередбаченим аваріям та масштабним викидам. Прикладом є платформа «Sentinel» від ArcelorMittal, яка прогнозує відмови зі «100% успіхом»;

2. Оптимізація виробничих процесів: ШІ-системи оптимізують параметри виробництва в реальному часі, мінімізуючи енергоспоживання та відходи. Дослідження зафіксувало 2.5% скорочення енергоспоживання та 3.2% зменшення викидів CO₂ завдяки ШІ-оптимізації доменної печі;

3. Інтелектуальне управління відходами: ШІ може підвищити ефективність сортування металобрухту, сприяючи вторинній переробці та зниженню залежності від первинної сировини. Це демонструє, що впровадження ШІ не лише сприяє екологічній безпеці, а й призводить до значної економії, підвищення продуктивності та фінансових вигід.

Висновки

Висновки підтверджують, що традиційні методи моніторингу не можуть вирішити складні екологічні виклики металургії через відсутність даних у реальному часі та нездатність виявляти комплексні кореляції. Ключовим результатом є обґрунтування застосування ШІ-систем, які інтегрують дані з IoT-сенсорів, систем дистанційного

зондування та виробничих параметрів. Такий підхід:

1. дозволяє ідентифікувати приховані залежності, що впливають на екологічну безпеку;
2. формулювати цільові, завчасні заходи для мінімізації впливу на довкілля;
3. прогнозувати ризики, що робить можливим перехід до проактивної моделі управління.

Інтерпретовані моделі, такі як SHAP, роблять висновки ШІ зрозумілими для інженерів, підвищуючи довіру до автоматизованих рішень. Впровадження ШІ-технологій, зокрема предиктивне обслуговування та оптимізація процесів, не лише сприяє екологічній безпеці, а й приносить значні економічні вигоди — скорочення витрат та підвищення продуктивності. Це перетворює екологічні ініціативи з витрат на стратегічні інвестиції у сталий розвиток.

Література

1. Steel industry net-zero tracker - The World Economic Forum, accessed August 20, 2025, <https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2023/in-full/steel-industry-net-zero-tracker/>
2. Why AI Agents is Future of Environmental Monitoring in Smart Factories - Akira AI, accessed August 20, 2025, <https://www.akira.ai/blog/ai-agents-for-environmental-monitoring>
3. The role of remote sensing in complementing ground-based air quality monitoring, accessed August 20, 2025, <https://www.clarity.io/blog/what-role-does-remote-sensing-play-in-complementing-ground-based-air-quality-monitoring-for-citywide-pollution-analysis>
4. Improving 3-day deterministic air pollution forecasts using ... - ACP, accessed August 20, 2025, <https://acp.copernicus.org/articles/24/807/2024/>
5. Великі мовні моделі, інженерія запитів та агенти / О. Краковецький. – Київ: Видавничий будинок «Аванпост-Прим», 2025. – 242 с.

Малий Д. К., аспірант;

Дудар Т. В., д-р. техн. наук, проф.

Державний університет «Київський Авіаційний Інститут», м. Київ, Україна

СУЧАСНІ ДИСТАНЦІЙНІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ: СУПУТНИКОВІ ПЛАТФОРМИ ТА БПЛА

Забруднення повітря залишається однією з найсерйозніших екологічних проблем, а в Україні воєнні дії одночасно створюють нові джерела забруднення (вибухи, пожежі) та унеможливають роботу багатьох стаціонарних постів. Так, у Бахмуті й Торецьку екологічний контроль було призупинено від початку повномасштабного вторгнення. Це зумовлює потребу в дистанційних технологіях моніторингу, що дозволяють збирати дані без присутності людини в небезпечних зонах.

До таких засобів належать безпілотні літальні апарати (БПЛА) та супутникові системи. Дрони можуть нести сенсори для аналізу повітря, а супутники забезпечують широкий просторовий і часовий огляд. Для України ключовими є міжнародні платформи (Sentinel-5P, CAMS, Landsat, NASA Worldview), оскільки власних супутників екологічного моніторингу країна не має. Угода ДКАУ з Єврокомісією (2018) відкрила доступ до даних Sentinel і розширила можливості використання глобальних спостережень.

Мета огляду — проаналізувати сучасні дистанційні методи контролю якості повітря в умовах війни, оцінити можливості й обмеження БПЛА та супутників і визначити перспективи інтеграції цих даних у державну систему моніторингу.

Методи дистанційного моніторингу атмосферного повітря

Безпілотні літальні апарати (БПЛА)

В останні роки БПЛА стрімко увійшли до практики екологічного моніторингу як мобільні платформи для оперативного збору даних. Оснащені портативними газоаналізаторами та іншими сенсорами, безпілотники здатні вимірювати концентрації забруднювальних речовин безпосередньо в приземному шарі атмосфери. Зокрема, сучасні промислові БПЛА з газоаналізаторами можуть отримувати дані про вміст газів на різних висотах і будувати детальні тривимірні карти забруднення повітря.

Наприклад, спеціалізоване обладнання типу Sniffer4D, встановлене на БПЛА, забезпечує швидке та високоточне 3D-сканування розподілу домішок у повітрі з одночасним виявленням різних небезпечних газів. Це дозволяє використовувати БПЛА для вирішення широкого кола задач: від експрес-моніторингу повітря під час надзвичайних ситуацій (для оцінки хімічної небезпеки) до контролю викидів на промислових об'єктах та пошуку місць витоку токсичних речовин. Дрони здатні підлетіти безпосередньо до джерела забруднення (наприклад, до труб заводів або місць пожеж) і відібрати проби чи провести вимірювання, що значно підвищує точність та оперативність екоконтролю порівняно зі стаціонарними наземними постами.

Однак, використання безпілотників має і суттєві обмеження, особливо в умовах бойових дій. По-перше, це обмежений радіус дії та час автономного польоту більшості БПЛА – вони можуть покривати відносно невелику площу і потребують регулярної підзарядки чи заміни батарей. По-друге, в районах, наближених до фронту, діють жорсткі регуляторні заборони на польоти, зумовлені питаннями безпеки. Згідно з правилами воєнного стану, в зонах активних бойових дій польоти БПЛА цивільними особами повністю заборонені без дозволу військових, у прифронтових регіонах – можливі лише за погодженням із військовою адміністрацією. Навіть у відносно безпечних областях запуск БПЛА дозволяється тільки після подання заявки та отримання спеціального дозволу від відповідних органів. Порушення цих правил може розглядатись як загроза: кожен несанкціонований безпілотник поблизу лінії фронту ризикує бути виявленим і знищеним як ворожа ціль, а оператор притягнений до відповідальності. Окрім ризику фізичного знищення, військові технології радіоелектронної боротьби (РЕБ) можуть придушувати сигнали управління БПЛА, роблячи їх використання небезпечним і малоефективним у прифронтовій зоні. Таким чином, попри високий потенціал БПЛА у екологічному моніторингу, їх застосування в умовах війни значно обмежене як практичними (малий радіус дії), так і нормативними факторами (заборони польотів, ризику безпеки).

Супутникові платформи та служби моніторингу (Sentinel-5P, CAMS, Landsat, NASA Worldview)

Супутникове спостереження атмосфери надає унікальну можливість відстежувати якість повітря на великих територіях з мінімальним часовим інтервалом. Програма ЄС Copernicus має спеціалізовані місії для моніторингу атмосфери – передусім, супутник Sentinel-5P (TROPOMI), запущений у 2017 році. Sentinel-5P здійснює щоденні глобальні спостереження та вимірює концентрації ряду

газоподібних забруднювачів, зокрема діоксиду азоту (NO_2), озону (O_3), монооксиду вуглецю (CO), діоксиду сірки (SO_2), формальдегіду (HCHO) та метану (CH_4).

Просторова роздільна здатність TROPOMI становить близько 7×7 км (покращена до $\sim 5,5$ км після середини 2019 року), що дозволяє досить детально картувати забруднення над містами та промисловими зонами. Дані цього супутника є відкритими і доступними практично в режимі реального часу через інтернет-сервіси (наприклад, Sentinel Hub). Для України інформація із Sentinel-5P стала цінним джерелом відомостей про стан атмосфери, особливо в регіонах, де відсутні наземні станції або неможлива робота фахівців. За допомогою знімків Sentinel-5P отримано картину середнього рівня забруднення повітря по країні: найбільш несприятливими виявились індустриальні області – Дніпропетровська, Донецька, Запорізька, Луганська, а також Київський регіон. У розрізі міст найвищі показники забруднення (наприклад, за вмістом NO_2) зафіксовано над такими великими центрами, як Дніпро, Донецьк, Кривий Ріг, Київ, Маріуполь, Запоріжжя. Ці результати супутникового моніторингу узгоджуються з очікуваним розподілом промислових і урбанізованих територій, підтверджуючи достовірність методики.

Важливо, що супутники дозволяють оцінити вплив надзвичайних подій (таких як війна) на якість повітря. Так, аналіз даних Sentinel-5P за період повномасштабного конфлікту 2022 року показав суттєві зміни в концентраціях деяких забруднювачів порівняно з «довоєнними» роками. Зокрема, на тлі загального спаду промислової активності рівні NO_2 та SO_2 в Україні знизилися, тоді як фоновий озон (O_3) та монооксид вуглецю в ряді регіонів зросли. За даними досліджень, концентрація SO_2 у розпал бойових дій зменшилась у середньому вчетверо, що пояснюється зупинкою багатьох підприємств та зниженням викидів від спалення палива. Водночас, поодинокі епізоди сильного забруднення реєструвались під час бомбардувань і масштабних пожеж – передусім зростали рівні дрібнодисперсного пилу $\text{PM}_{2.5}$ та інших продуктів горіння. Такі пікові випадки часто мають локальний характер і короточасні, тому їхня фіксація з супутника залежить від часу прольоту та наявності хмарності. Тим не менш, загальна картина, отримана із космосу, свідчить про істотний вплив війни на якість повітря в Україні, що важливо враховувати при оцінці ризиків для здоров'я населення.

Окрім безпосередніх спостережень супутників, для комплексного моніторингу атмосфери використовуються *моделі та сервіси прогнозування*. Один з ключових інструментів такого типу – Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), що є частиною програми Copernicus. CAMS забезпечує глобальні та регіональні (зокрема

європейські) оцінки якості повітря, поєднуючи дані спостережень з супутників і наземних станцій із сучасними моделями хімії атмосфери. На європейському рівні CAMS щодня формує детальний аналіз стану повітря з просторовою роздільною здатністю $\sim 10 \times 10$ км та прогнозує його на 4 дні вперед. Для цього залучено ансамбль з дев'яти моделей, результати яких усереднюються, а також виконується асиміляція даних спостережень – зокрема, враховуються виміри стаціонарних станцій Європейського агентства з довкілля, щоб уточнити модельні поля. Важливо, що CAMS надає інформацію про такі показники, які не вимірюються безпосередньо Sentinel-5P.

Наприклад, концентрації твердих часток $PM_{2.5}$ та PM_{10} отримують із моделі CAMS, оскільки супутникові прилади наразі не дають прямого вимірювання масової концентрації аерозолі. Це дозволяє заповнити прогалини у даних: комбінуючи спостереження Sentinel-5P (для газів) з модельними оцінками CAMS (для дрібного пилу), можна отримати повний набір параметрів якості повітря. Серія даних CAMS доступна через відкритий портал Atmosphere Data Store і надається з високою часовою роздільністю (1 година) на різних висотних рівнях, що дає можливість аналізувати добові коливання забруднення та перенос домішок у вертикальному профілі атмосфери. В контексті України, де наземна мережа моніторингу пилу обмежена, CAMS є практично єдиним джерелом даних про розподіл $PM_{2.5}/PM_{10}$ по всій території, особливо в районах, недосяжних для наземних спостережень через бойові дії.

До переліку корисних дистанційних засобів варто також включити мультиспектральні оптичні супутники, зокрема американські Landsat та аналогічні їм Sentinel-2. Хоча вони не вимірюють хімічний склад атмосфери, їхні знімки високої роздільної здатності (10–30 м) можуть допомогти побічно виявляти екологічні проблеми. Наприклад, на супутникових фото добре видно шлейфи диму від великих пожеж або пилові бурі; порівняння знімків до і після техногенних аварій дозволяє оцінити масштаби викидів (за площею вигорілих лісів, вигорання нафтових резервуарів тощо). Такі спостереження доповнюють дані спеціалізованих атмосферних місій і додають контекст для аналізу ситуації на місцевості.

Для оперативної візуалізації та аналізу різномірних супутникових даних широко використовується онлайн-платформа NASA Worldview. Це інструмент, що надає інтерактивний доступ до понад 1200 шарів супутникових зображень та продуктів спостереження Землі. Worldview підтримує *часово-критичні застосування* – зокрема, моніторинг лісових пожеж, оцінку якості повітря та відстеження погоди – оскільки більшість шарів оновлюється протягом кількох годин після спостереження супутником.

Через цю платформу екологи та управлінці можуть у зручному режимі переглядати актуальні карти аерозольного оптичного товщини (AOD), концентрації діоксиду азоту, наявності пожеж (термальні аномалії) та інших показників у будь-якій точці світу. Великим плюсом є можливість переглядати історичні дані за минулі періоди, що дозволяє аналізувати динаміку змін якості повітря у часі. Наприклад, використовуючи Worldview, можна зіставити зображення території України до війни і під час активних бойових дій, побачивши, як змінились показники забруднення над окремими регіонами. Інтерфейс Worldview доволі простий і не вимагає спеціальних знань з обробки супутникової інформації, що робить цей ресурс цінним для оперативного прийняття рішень. Попри певні обмеження (зокрема, супутникові дані доступні зазвичай з добовим інтервалом і недоступні під час хмарності), Worldview та подібні інструменти відкривають широкі можливості для країн, де бракує густої мережі наземних датчиків. Вони фактично знімають інформаційний вакуум над «білими плямами» на карті моніторингу, надаючи критично важливі дані про стан атмосфери над морем, тимчасово окупованими чи небезпечними територіями, тощо.

Аналіз та обговорення

Обмеження БПЛА та переваги супутників у воєнний час

У повномасштабній війні можливості БПЛА та супутників різко відрізняються. З одного боку, безпілотники дають високу локальну точність: вони відбирають проби повітря безпосередньо з дихального рівня й досліджують окремі об'єкти з просторовим розрізненням до кількох метрів. Це незамінно для оцінки викидів конкретного підприємства чи концентрації небезпечних речовин у житловій зоні. Недоліком є обмежений радіус дії та тривалість польоту: для отримання регіональної картини потрібні сотні апаратів і операторів, що практично неможливо.

Супутники, натомість, охоплюють територію всієї країни. Sentinel-5P щодня здійснює глобальне сканування, CAMS надає щогодинні оцінки й прогнози. Дрони можуть працювати лише епізодично, тоді як супутники забезпечують регулярність і неперервність моніторингу.

За спектром показників БПЛА обмежуються кількома сенсорами, тоді як супутники й CAMS дають комплексну картину: гази (NO_2 , SO_2 , O_3), аерозолі (AOD), концентрації $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ та метеопараметри. У безпосередній близькості до джерела забруднення дрони точніші, адже супутники зазвичай вимірюють інтегральні значення по вертикальному стовпу атмосфери, що потребує моделей для перерахунку у

приземні концентрації. Оптимальним є використання наземних станцій і БПЛА для калібрування супутникових даних.

Щодо безпеки та вартості: супутники працюють із орбіти, не наражаючи людей на ризик, і забезпечують ефект масштабу — їхні дані доступні багатьом країнам. Дрони ж можуть бути збиті, а їх широке застосування у прифронтових умовах економічно й технічно неефективне.

Отже, БПЛА та супутники слід розглядати як взаємодоповнюючі. Перші виконують точкові завдання (хімічні аварії, локальні викиди), другі — забезпечують фон і аналіз загальних тенденцій. Поєднання цих методів дає найповнішу картину стану атмосферного повітря.

Висновки

У воєнних умовах дистанційні методи моніторингу якості повітря стали критично необхідними: вони компенсують втрату стаціонарних постів і забезпечують дані для небезпечних або недосяжних територій. БПЛА ефективні для локальних вимірювань, аварійних ситуацій і 3D-візуалізації забруднення, проте обмежені технічно та регуляторно. Супутники Copernicus і NASA забезпечують регулярні спостереження та широкий огляд, а CAMS доповнює їх оцінками концентрацій твердих часток і прогнозами.

Порівняльний аналіз показує: супутники перевершують БПЛА у масштабності та сталій доступності даних, натомість БПЛА точніші для локального контролю. Оптимальною є їхня комбінація — супутники для фонових моніторингу та трендів, дрони для перевірки і уточнення критичних точок.

Для України, яка не має власних супутників, ключовим завданням є інтеграція міжнародних даних у національну систему моніторингу. Це дозволить підвищити надійність контролю, своєчасно реагувати на загрози та планувати післявоєнне відновлення промисловості з урахуванням екологічних вимог. Поєднання БПЛА, супутників і наземних станцій є основою екологічної безпеки та сталого розвитку країни.

Література

1. Карпенко О., Шелестов А., Яйлимова Г. Інформаційні технології супутникового моніторингу якості повітря: рішення для України. *ECOBUSINESS. Екологія підприємства*. 2021. URL: <https://ecolog-ua.com/news/informaciyini-tehnologiyi->

- suputnykovogo-monitoryngu-yakosti-povitrya-rishennya-dlya-ukrayiny (дата звернення: 06.09.2025).
2. Яка якість повітря у Дружківці. *Дружківка на долонях*. 18.07.2025. URL: <https://druzhkivka.city/articles/3797/yaka-yakist-povitrya-u-druzhkivci> (дата звернення: 08.09.2025).
3. Чи можна використовувати дрон у воєнний час? *Zelen-Store*. 2023. URL: <https://zelen-store.com.ua/blogs/dron-u-voyennij-chas> (дата звернення: 08.09.2025).
4. DroneUA запускає перші системи для еко-моніторингу. *DroneUA*. 2020. URL: <https://drone.ua/droneua-zapuskae-pershi-systemy-dlya-eko-monitoryngu/> (дата звернення: 10.08.2025).
5. Mehrabi M., Konovalov I., Beekmann M., et al. Air quality monitoring in Ukraine during 2022 military conflict using Sentinel-5P imagery. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01536-y>.
6. Zalakeviciute R., Jhun I., Lopez-Villada J., et al. War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(19). P. 12233. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912233>.
7. Air Pollution in Ukraine from space. *Arnika Association*. 2020. Оновлено 2024. URL: <https://english.arnika.org/air-pollution-in-ukraine-from-space> (дата звернення: 22.08.2025).
8. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Стан та перспективи розвитку державної системи моніторингу довкілля. Аналітична записка. Київ: Міндовкілля, 2023. 32 с. URL: <https://mepr.gov.ua> (дата звернення: 08.09.2025).
9. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Technical Documentation. ECMWF, 2020. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu> (дата звернення: 06.09.2025).
10. NASA ARSET. Satellite Air Quality Monitoring: Introduction to the NASA WorldView. NASA Applied Remote Sensing Training, 2015. URL: <https://arset.gsfc.nasa.gov/airquality/webinars/2015> (дата звернення: 01.09.2025).
11. Khabarova H.V., Kovalenko G.D., Barbashev S.V. Application of satellite technologies for monitoring the radiation state of the atmospheric air during the war and post-war reconstruction of Ukraine. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2025, № 3(157), с. 194–199. DOI: 10.46813/2025-157-194.

Мельнікова О. Г., канд. техн. наук;

Юрченко В. О., д-р техн. наук;

Багмут Л. Л., аспірант

*Харківський національний муніципальний університет ім. О. М. Бекетова, м. Харків,
Україна*

ТЕХНОЛОГІЇ СТАЛОГО МІСЬКОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПОВЕРХНЕВИМИ СТІЧНИМИ ВОДАМИ У м. ХАРКІВ

Технології сталого міського водовідведення – це методи та техніки, що імітують природні екосистеми у відведенні дощової води та починають діяти одразу, де випадає дощ. Метою такої системи є збір атмосферних опадів та зниження швидкості їх стоку, таким чином частина води випаровуватиметься та вбиратиметься в ґрунт, одночасно очищаючи воду від забруднень. Так заходи дозволять значно знизити кількість фільтрованих опадів, що потрапляють до ґрунтових вод, що для міста Харків є надзвичайно актуальним [1].

Харків є містом з великою територією (306,0 км²), левову частку якої займає житловий фонд та громадські будівлі (37%). Другими за площею є захисно-рекреаційні території, що складають 25% від загальної території міста. Промислові комплекси на території міста займають 15%. Транспортна мережа займають 7%, 51% з яких припадає на вулиці міського значення, а супутня транспортна інфраструктура: гаражні кооперативи, місця для паркування, станції технічного обслуговування тощо, загалом займають близько 14%. Найменшу частину території міста займають поверхневі природні водойми (річки з русловими водосховищами та малі річки) – 2%. Таким чином на долю непроникних, або частково проникних територій припадає майже 73% від загальної площі міста. Саме тому проблема менеджменту поверхневого стоку, що утворюється на території міста Харків є надзвичайно актуальною [2].

Мета дослідження – розглянути сучасні технології водовідведення для імплементації їх в систему керування поверхневими стічними водами у місті Харків.

До поняття поверхневого стоку входить вся атмосферна вода, що потрапляє на поверхню землі. В залежності від якості поверхні з якою контактує атмосферна вода, а також ступінь забрудненості атмосферного повітря буде залежить хімічний склад таких вод і відповідно їх екологічна безпека для компонентів навколишнього середовища з якими вони контактують (табл.1).

Таблиця 1 – Середня концентрація забруднюючих речовин в дощовому стоці на досліджуваних майданчиках, мг/л [3]

Показники	Місця відбору проб			
	Багатоквар- тирна забудова	Приватний сектор	Міський парк	Територія адміністративної установи
Азот амонійний	1,7	1,8	0,35	1,55
Азот нітратний	0,51	0,64	0,1	0,47
Азот нітритний	0,32	0,24	0,16	0,31
Фосфор	0,31	0,6	0,11	0,4
Зважені речовини	587	913	213	629
Нафтопродукти	3,7	1,6	0,5	4,1
БСК ₅ мг O ₂ /дм ³	71	26	24	64

За даними табл. 1 бачимо, що хоча більшість показників знаходяться в межах ГДК для природних водойм, але деякі з них, наприклад амонійний азот знаходяться на межі ГДК. В свою чергу на територіях житлової та адміністративної забудови, які розташовані неподалік міських автомобільних доріг спостерігався підвищений вміст БСК₅, що ймовірно вказує на накопичення значних концентрацій поллютантів на цих територіях, які мають непроникні покриття, а відповідно утворений дощовий стік буде спрямований до найвищих природних водних об'єктів. Також за результатами досліджень хімічного складу дощових стічних вод [3] було проаналізовано такий показник як ХСК на фільтрованих та не фільтрованих пробах. Отримані результати: ХСК фільтрованих – 40 мг/дм³, ХСК не фільтрованих – 470 мг/дм³ [3], вказують на те, що основна кількість органічних забруднювачів концентрується на завислих речовинах, вміст яких у дощових стічних водах є достатньо високим і основним їх джерелом є також автомобільні дороги. Все це свідчить про потенційну екологічну небезпеку таких вод для природних водойм, які розташовані на території міста.

Територією м. Харків протікають: р. Уди, р. Лопань, р. Харків та р. Немишля. Річка Уди хоча і є найбільш повноводною серед інших річок м. Харків, але й характеризується високим вмістом забруднюючих речовин, в свою чергу р. Харків та р. Немишля періодично преривають своє русло у зв'язку з пересиханням. Таким чином можна стверджувати, що гідрологічний режим річок міста значно порушений. Зокрема це пов'язано з наносами, що тягнуться по дні чи знаходяться у завислому стані,

осаджуючись на дні вони призводять до обміління річкового русла. Крім того, високі рівні ґрунтових вод, на території міста, мають схильність до підвищення, що може бути пов'язано з розораністю схилів і заплавних ділянок [4].

У зв'язку з вище викладеним стає очевидним, що керування поверхневими стічними водами на території міста є першочерговим завданням для збереження та відновлення річкової системи міста, а також підтримки гідрологічного режиму ґрунтових вод.

Одним з таких рішень, що покликане вирішити це завдання може стати управління потоками поверхневих стічних вод, що є основним джерелом водо забезпечення річкових систем міста, через імплементацію зеленої та зелено-блакитної інфраструктури на території міста Харків.

Зелена інфраструктура (ЗІ) – це стратегічно спланована мережа природних та напівприродних територій з іншими екологічними функціями, розроблена та керована для надання широкого спектру екосистемних послуг, таких як очищення води, якість повітря, простір для відпочинку, а також пом'якшення зміни клімату та адаптація до неї [5]. Зелена інфраструктура розглядається як інструмент, що дозволяє забезпечити екологічні, економічні та соціальні вигоди шляхом впровадження природних (зелених) рішень.

Основним видом міських зелених насаджень є парки, що представляють собою багатопланову об'ємно-просторову композицію (рис. 1).



Рисунок 1 – Озеленення міських територій у вигляді паркових зон

Але, оскільки основний поверхневий стік на території міста формується на непроникних поверхнях житлової забудови та міських доріг, перш за все необхідно зосередитись на керування саме цими поверхневими стічними водами. Досліджуючи європейський досвід можна запропонувати декілька найбільш оптимальних рішень, які доцільно використати у м. Харків.

Інфільтраційна/регенераційна канава (рис. 2а) не містить дренажу, тому рекомендується для територій, де стік містить низький або помірний рівень забруднення (житлові райони, дороги з низьким трафіком тощо). Фізичні характеристики ґрунтів мають бути з високою швидкістю інфільтрації, яка не має бути нижчою ніж 1,32 см/год, оптимальний коефіцієнт інфільтрації для такої конструкції становить 2,5 см/год, при чому загальна глибина інфільтраційних шарів має бути не менше 0,75-0,8 м. Для найкращого ефекту очистки поверхневого стоку ґрунт для посадки повинен містити приблизно 40-60% піску, 20-30% верхнього шару ґрунту та 20-30% листового компосту. Дане рішення не передбачає прошарок геотекстилю між шаром ґрунту для посадки та існуючим ґрунтом. Для покращення інфільтраційної функції канави рекомендовано верхній шар зробити органічним з свіжої мульчі [6].

Тип інфільтраційного/фільтраційного/ заправного каналу (рис. 2б) краще підходить для територій, із значно вищим рівнем забруднення біогенними елементами (органічні забруднення), переважно це житлові райони. Дана конструкція передбачає наявність шару гравію під піднятою дренажною трубою. Гравійний прошарок забезпечує аеробну/анаеробну зону коливання, що забезпечує процес денітрифікації, а також цей прошарок слугує для депонування певної кількості води. В даній конструкції передбачено використання фільтруючого шару, який має бути розташований між ґрунтом для рослин і гравійними шарами, але при цьому фільтруюча тканина не має вистилати стінки канави і простір навколо труби [6].

Фільтраційний тип каналу (рис. 2в) може бути запропонований на ділянках з значним вмістом забруднюючих речовин у поверхневому дощовому стоці, зокрема: на територіях з інтенсивним рухом транспорту, на заправних станціях, автостоянках тощо. Особливість даної конструкції є обов'язкове використання непроникної підкладки, що розташовується між стінами споруди та ґрунтом. Це прошарок дозволяє уникнути інфільтрації стічних вод до більш глибоких шарів ґрунту, а відтак і подальшу їх інфільтрацію до ґрунтових вод. Тільки процес фільтрації через різні поверхневі шари забезпечує функцію очищення. Така конструкція дає можливість контролю якості стоку (рис. 2) [6].



Рисунок 2 – Різновиди фільтраційних та інфільтраційних каналів, як природоохоронні технології по управлінню поверхневим стоком у містах

Біофільтри – це заглиблені дощові ліжка або зарослі рослинністю інфільтраційні ліжка, де вода просочується і очищується рослинами та фільтрувальним матеріалом за допомогою комбінації механічного, хімічного та біологічного відокремлення. Правильне проєктування та вибір фільтрувального матеріалу мають вирішальне значення для того, аби ефективність очищення дощової води була максимальною. Фільтрування дощової води дозволяє відокремити тверді частинки та розчинені забруднення перед тим, як дощова вода транспортується далі. На рисунку 3 показано принципові схеми біофільтрів. Для мінімізації ризику засмічення, що є великою проблемою для біофільтрів, рекомендується попередня обробка з метою відокремлення осаду. Зимові умови можуть певною мірою впливати на очищення, але в цілому біофільтри працюють навіть у холодному кліматі [7, 8]. Дощова вода, просочуючись крізь фільтруючий матеріал, збирається в нижньому дренажному шарі. Очищена вода відводиться через дренажну трубу в нижній частині до трубопровідної мережі або іншого типу дренажної системи. Якщо дозволяють умови ґрунту та ґрунтових вод, очищена вода також може витікати для подальшого просочування (рис. 3) до ґрунтових вод. Якщо забезпечено достатній об'єм резервуара, можна затримати навіть великі потоки. Таким чином, біофільтри можуть слугувати затримкою для дощової води, щоб буферизувати пікові потоки в міських районах [9].

Біофільтри можуть бути побудовані в різних масштабах, від невеликих локальних очисних споруд у щільно забудованому середовищі до великих кінцевих очисних споруд для очищення зливових вод з більших водозбірних площ перед скиданням у природні водойми міста (рис. 3).

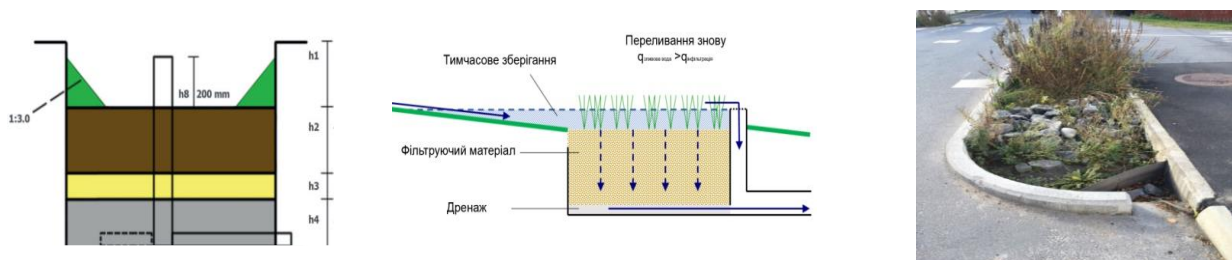


Рисунок 3 – Принципова схема біофільтру

Ліве зображення: z = ухил схилу, $h1$ = контрольна висота від фільтрувального матеріалу до навколишнього ґрунту, $h2$ = товщина фільтрувального матеріалу, $h3$ = товщина шару, що розділяє матеріал, $h4$ = товщина щебеню, $h6$ = товщина підґрунтя до максимального рівня

ґрунтових вод, h_7 = відстань від дренажної труби водотоку до підґрунтя та h_8 = відстань від впускного переливного колодязя до поверхні фільтрувального матеріалу. Товщина h_5 відсутня на зображенні, але стосується будь-якої додаткової товщини шару скелетного ґрунту (або іншої добавки) під шаром щебеню.

Крім того, біофільтри можуть бути естетично привабливою та природною технологією, яку можна добре інтегрувати як у нове, так і в існуюче міське середовище [10]. Однак слід враховувати, що між проектуванням та технічною (очисною) функцією (наприклад, удобрення або вибір фільтрувального матеріалу) може також виникнути конфлікт інтересів.

Скелетні конструкції створюються головним чином з метою забезпечення несучої здатності та сприятливих умов для росту рослин (часто для міських дерев). Для створення скелетної конструкції використовують опорний субстрат – це макадам (в даному випадку щебінь), який змішується з землею або, наприклад, біовугіллям. Метою є створення за допомогою суміші ґрунту та макадаму кращих умов для розвитку кореневої системи. Така конструкція також сприяє для затримки дощової води з доріг і паркувальних майданчиків. Очисна функція насамперед буде залежити від матеріалів, які будуть додаватись до «скелетної» землі, та сорбційної здатності цих матеріалів. На рисунку 4 показано принциповий ескіз каркасної конструкції з вхідним колодязем, шаром макадаму і каркасною землею під ним.

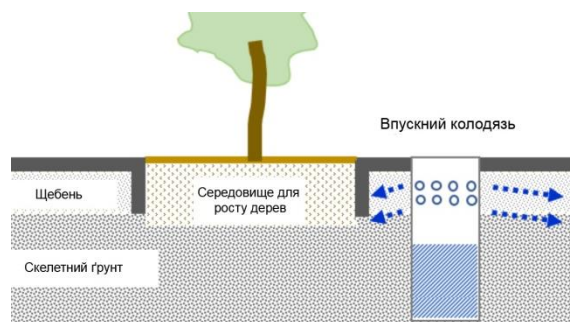


Рисунок 4 – Принципова схема конструкції каркасу

Дослідження, щодо ефективності очисної здатності таких конструкцій, знаходяться на етапі лабораторних експериментів. Труднощі полягають у підборі найбільш ефективного матеріалу для каркасної землі, а також постає питання щодо зручності обслуговування таких споруд у процесі експлуатації (це стосується, перш за все, видалення накопичених осадів). Осади і, отже, забруднення, пов'язані з частинками, дуже добре відокремлюються, однак це призводить до високого ризику засмічення. Очищення буде ефективнішим, якщо каркасна конструкція буде заглибленою і зможе просочувати дощову воду через рослинний

ґрунт/фільтрувальний матеріал. Рекомендується удобрювати каркасні ґрунти, шляхом додавання біовугілля. Ця рекомендація базується на тому, що якщо біовугілля не удобрювати, існує ризик, що воно зв'яже поживні речовини з ґрунту, що призведе до зменшення кількості поживних речовин для росту рослин. Однак додавання добрив може призвести до чистого вивільнення поживних речовин, що зазвичай не є прийнятним для даного конструктивного рішення. Однак вміст поживних речовин у дощовій воді може бути достатнім для задоволення потреб рослин [11]. Внесення поживних речовин за допомогою добрив або інших добавок з високим вмістом поживних речовин, наприклад компосту, бажано взагалі не проводити [11], або лише у випадку з великою обережністю і тільки на біовугіллі, найближчому до коренів посадженого дерева, і в поєднанні з не удобреним біовугіллем на дні.

Ступінь очищення також залежить, від співвідношення між площею об'єкта та зменшеною площею водозбірного басейну (площа $\times$ коефіцієнт водозбору), вмістом політантів на вході, мінімально можливим вмістом на виході та можливим переливом (частка річного обсягу стоку, що переливається).

Висновки

Таким чином європейський досвід у імплементації природоохоронних технологій, щодо керування поверхневим стоком що утворюється на території м. Харків може бути досить успішно використаний не тільки при проектуванні нових житлових масивів, але й на вже функціонуючих територіях де існує необхідність контроль та управління поверхневим стоком.

Література

1. Dhakal K. P., & Chevalier, L. R. Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. *Journal of Environmental Management*, 203, 171–181. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.065>
2. Про затвердження проектів землеустрою з організації та встановлення меж території рекреаційного призначення м. Харкова «Зелені зони та зелені насадження» – Реєстр актів харківської міської ради. Реєстр актів харківської міської ради. URL: <http://kharkiv.rocks/reestr/288300>.
3. Шестопалов О.В., Тихомирова Т.С., Стаднік В.Ю. Екологічна оцінка хімічного складу дощових стічних вод на дитячих ігрових майданчиках м. Харків. *Науково-практичний журнал Екологічні науки* № 4(49) С. 52-57, 2023. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.7>

4. Решетченко С. Дмитрієв С. Оцінка екологічного стану річкового басейну Сіверського Дінця у межах Харківської області. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії №36, С. 34 – 42. 2022. DOI: <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2022-36-04>
5. Міста живі: переосмислення зеленої інфраструктури. Project report. London, 2014, 161 с.
6. Skryhan H., Shkaruba A. Green infrastructure & urban forestry: strategic management for mitigation and adaptation to climate change in the cities. Green & Blue Infrastructure in Post-USSR cities: exploring legacies and connecting to V4 experience: collective monograph / Ed. by Nadiya V. Maksymenko, Anton D. Shkaruba. –Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, P. 62 – 104. 2022.
7. Blecken G. (2016) Kunskapssammanställning Dagvattenrening. SVU rapport 2016-05.
8. Sørberg, L. Bioretention for stormwater quality treatment: Effects of design features and ambient conditions. Doktorsavhandling, Avdelningen för Arkitektur och vatten, Luleå tekniska universitet, Luleå, Sverige, 2019. ISBN 978-91-7790-362-8.
9. Penn C.J. och Bowen J.M. Design and construction of phosphorus removal structures for improving water quality. Springer, USA. 2018.
10. Blecken, G. Biofiltration Technologies for Stormwater Quality Treatment. Doktorsavhandling, Avdelningen för Arkitektur och infrastruktur, Luleå tekniska universitet, Luleå, Sverige, 2010. ISBN 978-91-7439-132-9.
11. Larm T. och Wahlsten A. Litteraturstudie av reningseffekten i olika typer av skelettjordar och växtbäddar. Översikt med fokus på tillämpning med biokol och andra tillsatser. Rapport 2017-08-14, StormTac på uppdrag av Stockholms Stad. 2017.

Миргород О. В., канд. техн. наук, ст. наук. співр., доц.;

Пирогов О. В., канд. техн. наук, доц.;

Рудаков С. В., канд. техн. наук, доц.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ СЕНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ВИРОБНИЧИХ БУДИНКІВ ТА СУСПІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ

Застосування матеріалів з невідомими показниками пожежної небезпеки та будівельних конструкцій в яких не визначена межа вогнестійкості є однією з причин наслідків впливу пожеж. Одним з ключових напрямків в українському будівельному просторі є підвищення якості та безпеки об'єктів будівництва. Використання сучасних технологій призводить до того, що необхідно відмовитися від будівництва за типовими проектами та застосовувати нові будівельні матеріали і конструкції.

На сучасному етапі розвитку суспільства важливість вирішення задачі підвищення ефективності систем протипожежного захисту будівельних об'єктів та мінімізації впливу пожежних небезпек стає особливо актуальною. Це обумовлено необхідністю дотримання сучасних стандартів і вимог у сфері пожежної безпеки.

Проектування об'єктів із використанням вогнестійких конструкцій передбачає наявність докладних даних щодо їх стійкості до впливу високих температур та інших показників, що визначають рівень пожежної небезпеки. Такі характеристики, як здатність до горіння, легкість займання, поширення полум'я по поверхні конструкції, утворення диму та токсичність продуктів горіння, відіграють ключову роль у визначенні пожежної небезпеки матеріалів та елементів конструкцій.

На сьогоднішній день сендвіч-панелі знаходять широке застосування у цивільному та промисловому будівництві. Вони являють собою тришарову конструкцію, що складається з двох зовнішніх шарів оздоблювальних матеріалів, таких як гіпсокартон, оцинкований листовий метал, дерев'яний шпон або фанера, між якими розташований теплоізоляційний шар [1].

В Європі провідними виробниками теплоізоляційних матеріалів є компанії, що працюють під брендами PAROC, ROCKWOOL та IZOVER. Відмінності у конструкціях сендвіч-панелей здебільшого зумовлені використанням різних типів теплоізоляції.

Найпоширенішими матеріалами є пінополістирол, мінеральна вата та пінополіуретан [2-3].

Оптимальними характеристиками теплозбереження (у порівнянні з пінополістиролом, базальтовим волокном або мінеральною ватою) мають сендвич-панелі з пінополіуретановим утеплюючим матеріалом. Вони набагато ефективніше забезпечують заощадження тепла, чим звичайні будматеріали, такі як цегла, деревина, бетон. Використання твердого пінополіуретану як наповнювача підсилює звукоізоляційні властивості покриття, знижує гігроскопічність, робить його стійким стосовно хімічних, а також радіаційних впливів.

У житловому або промисловому будівництві широко застосовуються стінові (для зведення стін, стель всередині приміщення, укладання підлог) і покрівельні панелі (для покриття дахів). Завдяки своїй конструкції, вони є ідеальним матеріалом для швидкого зведення стін або улаштування покрівель, насамперед, господарських або промислових будов, наприклад, холодильних камер промислового призначення, холодильних складів.

Їхнє застосування дозволяє забезпечити набагато більш високу швидкість монтажу в порівнянні із традиційними матеріалами - за рахунок надійного замкового з'єднання (так званий принцип конструктора), а невелика вага знижує навантаження на фундамент майбутньої споруди.

Крім того, сендвич-панелі, забезпечують можливість цілорічного монтажу, тому що відсутня їх деформація при перепадах температури, що дозволяє значно заощадити експлуатаційні витрати.

Сучасні стінові сендвич-панелі широко застосовуються у будівництві споруд за різними технологіями монтажу, включаючи каркасний та самонесучий способи.

Дотримання експлуатаційних вимог і технологічних норм монтажу гарантує необхідний рівень герметичності та збереження тепла.

Завдяки легкості й високій стійкості до зовнішніх впливів покрівельні сендвич-панелі перевершують за якістю багато аналогічних матеріалів.

Тут також важливо помітити, що їх термін служби практично необмежений, при цьому вони зберігають свої експлуатаційні властивості. При необхідності конструкції можливо демонтувати, зберігаючи при повторному монтажі герметичність стику (замкового з'єднання).

Проте, серед різноманіття доступних на ринку сендвич-панелей, виробники часто утримуються від надання достовірної інформації про ключові характеристики таких

конструкцій. Зокрема, це стосується показників пожежної безпеки, санітарного стану та екологічності утеплювачів, які використовуються у їх виробництві. Тому, актуальним є дослідження взаємозв'язку між параметрами вогнезахисної здатності та показниками пожежної небезпеки під час експлуатації сендвич-панелей. Це дозволить обґрунтувати умови їх використання як безпечних матеріалів для будівельних конструкцій.

В Україні зростає попит на використання сендвич-панелі BUDIMPEKS фірми ТОВ «Лексмі-Метал» із товщиною пінополістиролу 100 мм (щільністю 110 кг/м³), загальний вигляд якої представлений на рисунку 1.

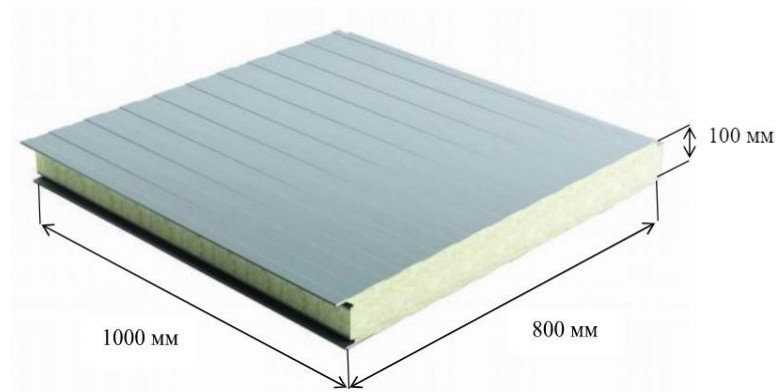


Рисунок 1 – Схема зразку тришарової сендвич-панелі з плитою із пінополістиролу

Панель має геометричні розміри 1000х800мм, товщиною 100 мм, виконана із двох сталевих оцинкованих листів товщиною 0,55 мм із лаковим покриття, між якими розташована теплоізоляційна плита з пінополістиролу, коефіцієнт теплопровідності 0,42 Вт/м²К.

Література

1. Журнал: «Будівельні матеріали і вироби» Випуск: №3–4, 2018

https://ndibmv.kiev.ua/wp-content/uploads/2015/10/Budivelni-materiali-i-virobi-N3-4-za-2018-r_compressed.pdf?utm_source=chatgpt.com.

2. ДСТУ Б В.2.7-316:2016 Плити та картон мінераловатні теплоізоляційні. Технічні умови.

3. ДСТУ Б В.2.7-184:2009 Будівельні матеріали. Матеріали звукоізоляційні та звукопоглинаючі. Методи випробувань.

Окольничий К. М., здобувач вищої освіти
Науковий парк «Алгоритм інновацій», м. Харків, Україна

БОРОТЬБА З РАДОНОМ У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ

Актуальність теми зумовлена наявністю значних територій з підвищеною радононебезпечністю та високим відсотком старого житлового фонду без належних протирадонних систем. Радон, що утворюється внаслідок розпаду урану в ґрунтах, гірських породах і деяких будівельних матеріалах, накопичується в приміщеннях і може становити до половини допустимої дози опромінення [1]. Масштабні епідеміологічні дослідження підтверджують, що тривале перебування в умовах підвищеної концентрації радону істотно збільшує ризик розвитку раку легень, і це потребує втручання, як на рівні законів країни, так і під час інженерно-будівельних підходів.

Огляд останніх директив та статей закону України щодо зниження рівня радону свідчать про активне вивчення проблематики радонового ризику на всіх рівнях управління. Директива ЄС 2013/59/Євратом встановила референтний рівень концентрації радону у приміщеннях не вище 300 Бк/м³ [2], тоді як Всесвітня організація охорони здоров'я рекомендує нижчий орієнтовний рівень – 100 Бк/м³ [3]. Пріоритетність цієї проблеми підтверджує спеціальний посібник міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) щодо захисту працівників від радону, виданий у 2024 р. [1]. Європейський проєкт RADONORM узагальнив практики боротьби з радоном у будівлях [4]. Даний проєкт дає змогу на даний час проводити нові експерименти.

Відповідно до статті 15 Закону України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання», вміст радону в житлових і виробничих приміщеннях не повинен перевищувати встановлених нормативів. Українське законодавство регламентує такі показники: для нових або реконструйованих будівель з постійним перебуванням людей допустима концентрація радону-222 становить 50 Бк/м³, а для наявних будівель- не більше 100 Бк/м³ [5]. Це підкреслює нагальну необхідність запровадження комплексних інженерно-технічних рішень у будівельній галузі для забезпечення належного захисту населення від негативного впливу радону та дотримання національних і міжнародних стандартів радіаційної безпеки.

Законом України «Про захист населення від іонізуючого випромінювання» були внесені зміни у 2023 році, які розширили повноваження Кабінету Міністрів. Тепер уряд відповідає за розробку та затвердження плану заходів, спрямованих на зниження рівня опромінення населення радоном. Цей план включає: мінімізацію довгострокових ризиків від поширення радону в житлових і нежитлових будівлях; контроль над джерелами проникнення радону (ґрунт, будівельні матеріали, вода); розробку стратегій для захисту населення на робочих місцях [6]. Відтепер ці зміни займають ключову роль у розв'язанні проблеми з концентрацією радону в українських приміщеннях.

Шведське управління з радіаційної безпеки (SSM) оцінило, що радон у повітрі є причиною близько 500 випадків раку легень у Швеції щороку. У відповідь на цю проблему, у співпраці з низкою державних установ, був розроблений національний план дій. План передбачає комплексні заходи для боротьби з довгостроковими ризиками впливу радону: проведення інформаційної кампанії, яка заохочуватиме населення вимірювати рівень радону у своїх будинках та мотивуватиме компетентні органи вживати заходів для зниження його концентрації; урядові органи мають координувати свої зусилля, щоб забезпечити ефективну багатосторонню комунікацію щодо ризиків радону; забезпечити зниження концентрації радону у всіх житлових приміщеннях до 200 Бк/м³ [7]. Такі плани є багатофункціональними і включають розробку нормативно-правової бази.

Огляд досліджень. Питання захисту від радону активно вивчається та досліджується українськими та міжнародними науковцями. Наприклад, наукова роботи на тему «Вдосконалення засобів та методів захисту від радону в приміщеннях» [8]. Праця повністю охоплює: характеристики радону, його джерела, вплив на здоров'я, регуляторні норми, а також комплексну систему заходів для захисту як у існуючих, так і в новобудовах, і особливо дослідження матеріалів, котрі корисні для будівництва задля мінімізації появи високої концентрації радону у приміщенні.

Мета дослідження полягає в узагальненні інженерно-будівельних підходів до боротьби з радоном та обґрунтуванні доцільності їх впровадження.

Завдання дослідження передбачає аналіз сучасних нормативних документів, що регламентують допустимі рівні радону. У межах цього дослідження необхідно систематизувати методи протирадонного захисту на етапі будівництва та під час експлуатації будівель, а також визначити найефективніші інженерні рішення, що

відповідають сучасним міжнародним практикам проектування планів житлового сектору.

Аналіз підходів до розв'язання проблеми. За даними Інституту громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва, станом на 2019 рік понад 20% житлового фонду України не відповідало нормам щодо вмісту радону. За оцінками 2015 року, економічні збитки від радону можуть сягати 1,5 мільярда гривень на рік [9]. Українські норми концентрації радону у приміщеннях є значно жорсткішими, ніж міжнародні.

Основою захисту є рання оцінка радононебезпечності території. Геологічні карти, дані про вміст урану в ґрунті та попередні вимірювання радону допомагають визначити ризики для майбутнього житла. В Україні найбільша потенційна небезпека існує в межах Українського кристалічного щита – території, що простягається вздовж середньої течії Дніпра смугою понад 1000 км завдовжки та близько 250 км завширшки [7]. У житловому секторі критично важливо контролювати концентрацію радону у підвалах і на перших поверхах, оскільки саме ці рівні є основними джерелами проникнення газу у квартири. Для багатоповерхових будинків вимірювання на різних поверхах дозволяють прогнозувати розподіл концентрації радону та оцінювати ефективність запланованих заходів.

Герметичні бар'єри, такі як: мембрани, плівки, бетонні плити з низькою проникністю – ефективно блокують проникнення радону з ґрунту. Герметизація швів та стиків фундаменту запобігає локальним витокам газу, які підвищують його концентрацію у підвалах і на перших поверхах. Особливо важливим є застосування спеціальних герметиків для комунікаційних введів труби та кабелі, через які радон легко проникає в житлові приміщення. Пасивна під підлогова вентиляція забезпечує природне відведення газу з під плитного простору під фундаментом. Активна система вентиляції з вентилятором є найефективнішим рішенням для регіонів з високою радононебезпечністю, коли пасивні системи не здатні знизити концентрацію до нормативного рівня. У багатоповерхових будинках доцільно проектувати індивідуальні канали відведення радону для кожного підвалу чи секції. Балансовані припливно-витяжні системи знижують концентрацію радону у квартирах, однак самі по собі не усувають джерело проблеми [7-8, 10]. Регулярне обслуговування вентиляційних систем та контроль ефективності повітрообміну, особливо взимку, є критично важливими. Для старого житлового фонду локальні вентиляційні системи, тобто відкриття вікон чи кухонна витяжка, часто стають єдиним практичним способом зменшення концентрації радону.

Довготривалі вимірювання рівнів радону в житлових приміщеннях, що повинні проводитися протягом кількох місяців з урахуванням сезонних коливань і не бути більше за встановлений рівень допустимого згідно статті закону України. Ці вимірювання дають можливість об'єктивно та всебічно оцінити ефективність застосованих інженерних рішень у реальних умовах експлуатації будівлі. Такий моніторинг дозволяє врахувати вплив кліматичних факторів, режимів опалення та вентиляції на міграцію радонових газів. При виявленні перевищення нормативних значень концентрації радону відразу впровадження додаткових заходів захисту [7-8, 10]. У житловому секторі нового будівництва при проектуванні треба враховувати встановлення додаткових приладів Інтернету речей, а у старому фонду оцінити вплив такого встановлення.

Деякі матеріали можуть виділяти радон із ґрунту чи деяких будматеріалів. Особливо важливим є контроль за вмістом радону в матеріалах, оскільки цей газ є небезпечним для здоров'я людей. Перевірка сертифікатів відповідності стандартам, що регулюють радіаційну безпеку, є обов'язковою. Особливо при будівництві нового житлових приміщень чи модернізації старого фонду.

Висновок

Тема радону є надзвичайно актуальною. Вона потребує об'єднання зусиль науковців в області радіоекології та будівельних компаній для того, щоб перетворити теоретичний аналіз на реальні та безпечні будівельні об'єкти. Для житлових будівель раціонально розробляти чіткі покрокові алгоритми реагування, які дозволять оперативно знизити концентрацію радону без проведення капітальних робіт. Найефективніший спосіб захистити людей від впливу – це інтеграція проти радонових заходів ще на етапі проектування. Для досягнення найкращих результатів, слід застосовувати такі методи: герметичний фундаментний бар'єр; під підлогова вентиляція та гарна вентиляція приміщень. Для України потрібно дотримуватися рівнем вмісту радону на позначці 100 Бк/м³, а гранично допустимий рівень – 300 Бк/м³. Надалі, важливо зосередитися на: контролі якості виконання проти радонових робіт; оцінці ефективності різних будівельних матеріалів, що використовуються для захисту від радону в житловому секторі; подальшому дослідженні практики знешкодження вмісту радону у приміщенні.

Література

1. New IAEA Publication on Protecting Workers Against Radon. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-publication-on-protecting-workers-against-radon> (Last accessed: 08.09.2025)
2. ДИРЕКТИВА РАДИ 2013/59/ЄВРАТОМ від 5 грудня 2013 року про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання, і скасування директив 89/618/Євратом, 90/641/Євратом, 96/29/Євратом, 97/43/Євратом і 2003/122/Євратом с. 74
3. Radon. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health> (Last accessed: 08.09.2025)
4. RADONORM. Report on radon control technologies used in buildings and building materials. – 2023. – URL: <https://www.radonorm.eu> (Last accessed: 08.09.2025)
5. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання. ЗАКОН УКРАЇНИ від 17.09.2023
6. Про внесення змін до деяких законів України щодо захисту людини від впливу іонізуючого випромінювання ЗАКОН УКРАЇНИ від 23.08.2023
7. Боротьба з радоном у житловому секторі. URL: <https://www.uatom.org/2021/07/28/borotba-z-radonom-u-zhitlovomu-sektori.html> (Дата звернення: 08.09.2025)
8. СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА на тему: Вдосконалення засобів та методів захисту від радону в приміщеннях URL: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/konkurs/radon.pdf (Дата звернення: 08.09.2025)
9. АНАЛІЗ РЕГУЛЯТОРНОГО ВПЛИВУ проєкту наказу Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Порядку проведення моніторингу радону в Україні та нотифікації про радіаційні ризики і Методики проведення моніторингу радону в Україні та визначення радононебезпечності територій» с.16 від 2023 року
10. День захисту від радону. Чим небезпечний радон та як уберегтися. URL: <https://www.phc.org.ua/news/den-zakhistu-vid-radonu-chim-nebezpechniy-radon-ta-yak-uberegtisya> (Дата звернення: 08.09.2025)

Полозенцева В. О., канд. техн. наук;

Юрченко А. І., завідувач лабораторії

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ УТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ З СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ТА ЇХ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Одним із ключових екологічних викликів сучасності є управління водними ресурсами в умовах змін клімату, інтенсифікації сільськогосподарського виробництва та деградації ґрунтів. Поверхневий стік із сільськогосподарських угідь є не лише джерелом втрати продуктивної вологи, а й чинником, що сприяє ерозії, змиву добрив і пестицидів, забрудненню водних ресурсів. Точне прогнозування обсягів та динаміки поверхневого стоку стає необхідною умовою сталого управління агроландшафтами.

У сучасній науковій практиці сформувався широкий спектр методів прогнозування поверхневого стоку: від простих емпіричних моделей до складних фізично-обґрунтованих або машинних систем прогнозу. Їх вибір залежить від доступності вхідних даних, мети дослідження, масштабів моделювання та технічних ресурсів.

Метою цієї роботи є огляд і порівняльний аналіз найсучасніших світових та вітчизняних методів прогнозування поверхневого стоку з сільськогосподарських угідь, а також оцінка можливості їх застосування в українських умовах.

У світовій практиці для прогнозування утворення поверхневого стоку найчастіше використовують глибокі неймережі (DAFormer, HydroGraphs), фізично обґрунтовані моделі (MIKE SHE, SWAT), гідрологічні системи (HEC-HMS) і емпіричні методи оцінки першого змиву (EMC) та гібридна модель PDBN [1–8].

Зазначені підходи є високотехнологічні та ґрунтуються на машинному навчанні, глибоких нейронних мережах, фізично обґрунтованому моделюванні та доменній адаптації даних. Зокрема, модель DAFormer демонструє високу точність прогнозів у регіонах з обмеженою кількістю вхідних даних [1].

Серед фізично обґрунтованих моделей варто відзначити MIKE SHE, яка охоплює повний гідрологічний цикл та успішно використовується в проектах

екологічної реабілітації в Данії, Індії, США та Китаї [3, 9–11].

У дослідженні, проведеному в штаті Вісконсин, США, модель HydroGraphs було використано для ідентифікації джерел забруднення поживними речовинами, що виникають внаслідок сільськогосподарської діяльності, та відстеження їх впливу на водні об'єкти. Модель дозволила ефективно виявити ключові джерела забруднення та оцінити їхній вплив на якість води [2].

Модель HEC-HMS, розроблена в США, є однією з найпоширеніших систем для моделювання гідрологічного стоку і також активно застосовується у Польщі та Чехії [12, 13], а також в українській практиці [14].

Інноваційним є також метод EMC і «першого змиву», що дозволяє оцінювати дифузне забруднення під час дощових подій, і знаходить застосування в міських та сільських басейнах Бразилії та Італії [15, 16].

PDBN дозволяє ефективно моделювати складні нелінійні взаємозв'язки між гідрологічними змінними, що особливо корисно для середньо- та довгострокового прогнозування стоку. Модель була створена у Китаї, де і набула широкого застосування [6].

Модель SWAT була розроблена в США для довгострокового моделювання гідрологічних та екологічних процесів у великих басейнах річок. Вона дозволяє оцінювати вплив змін у землекористуванні, кліматі та управлінні сільським господарством на водний баланс, ерозію ґрунтів, транспортування поживних речовин і пестицидів. Це одна з небагатьох моделей, яка була адаптована для умов України [17, 18].

В Україні застосовується широкий спектр підходів: емпіричні методи (метод В. М. Жука, А. І. Юрченка, коефіцієнтні методи), гідрологічні моделі (SCS-CN, SWAT), математичні моделі (детерміновані, стохастичні, гібридні), а також алгоритми машинного навчання (ANN, SVM, Random Forest, LSTM, CNN) [19–28].

Залежно від регіону застосовуються специфічні підходи: у степових регіонах основна мета – боротьба з ерозією та збереження вологи, у гірських районах – прогноз паводків і селів [14]. SCS-CN залишається найпопулярнішою моделлю на локальному рівні, тоді як SWAT широко використовується в рамках великих басейнів.

Емпіричні методи прогнозування поверхневого стоку залишаються важливим інструментом в Україні, особливо в умовах обмежених гідрологічних даних. Вони дозволяють швидко та ефективно оцінити водний режим сільськогосподарських угідь та приймати обґрунтовані рішення щодо управління водними ресурсами.

Таким чином, огляд іноземного досвіду у прогнозуванні утворення поверхневого стоку показує, що модель DAFormer демонструє високу адаптивність до регіонів з обмеженими вхідними даними. MIKE SHE забезпечує комплексне моделювання гідрологічного циклу, включаючи поверхневий та ґрунтовий стік, випаровування, інфільтрацію тощо. HEC-HMS активно застосовується у США та Європі як безкоштовна і доступна система для розрахунків стоку, а модель SWAT була успішно адаптована для умов України [17, 27].

Світові моделі відзначаються високою точністю, гнучкістю та здатністю до адаптації в умовах обмеженого доступу до даних, проте потребують складного налаштування і великих обчислювальних ресурсів. Вітчизняні методи простіші у впровадженні, проте іноді поступаються в точності.

Тому поєднання сучасних світових підходів із локальними українськими методами може дати синергетичний ефект. Адаптація таких моделей як DAFormer, MIKE SHE, HEC-HMS до умов України здатна значно підвищити якість управління водними ресурсами.

Висновки

Світовий досвід демонструє зростаючу роль складних фізичних і штучно-інтелектуальних моделей для прогнозування стоку. В Україні, попри обмежені ресурси, активно впроваджуються адаптивні локальні підходи, що враховують специфіку кліматичних умов і рельєфу. Найперспективнішим напрямом є інтеграція світових рішень (наприклад, DAFormer, MIKE SHE) з вітчизняними напрацюваннями і ГІС-технологіями для формування надійних регіональних моделей.

Література

1. Lukas Hoyer, Dengxin Dai, Luc Van Gool. DAFormer: Improving Network Architectures and Training Strategies for Domain-Adaptive Semantic Segmentation // Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (June 18–24, 2022). – New Orleans, LA, USA: IEEE, 2022. – P. 9924–9935. URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00969>.
2. David L. Cole, Gerardo J. Ruiz-Mercado, Victor M. Zavala. A Graph-Based Modeling Framework for Tracing Hydrological Pollutant Transport in Surface Waters // Computers & Chemical Engineering. – 2023. – Vol. 179. – Art. 108457. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108457>.

3. Jun-Tao, Zhang Hui-Min, Chang Bu-Hui. The Exploration Application of MIKE SHE Model in Qingtongxia Irrigation Area Water Recycle // *Advances in Engineering Research*. – Vol. 15. Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development (EESD 2016). – Atlantis Press, 2016. – P. 570–576. URL: <https://doi.org/10.2991/eesd-16.2017.79>.
4. Zhao H., Zhang J., James R. T., Laing J. Application of MIKE SHE/MIKE 11 Model to Structural BMPs in S191 Basin, Florida // *Journal of Environmental Informatics*. – 2012. – Vol. 19, issue 1. – P. 10–19. URL: [http://www.jeionline.org/index.php?journal=mys&page=article&op=viewFile&path\[\]=201200204&path\[\]=pdf_83](http://www.jeionline.org/index.php?journal=mys&page=article&op=viewFile&path[]=201200204&path[]=pdf_83). <https://doi.org/10.3808/jei.201200204>.
5. HEC-HMS Applications Guide / U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. – 2008. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.
6. Zhaoxin Yue, Ping Ai, Chuansheng Xiong, Min Hong, Yanhong Song. Mid- to long-term runoff prediction by combining the deep belief network and partial least-squares regression // *Journal of Hydroinformatics*. – 2020. – Vol. 22, issue 5. – P. 1283–1305. URL: <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.022>.
7. Singh P. Ganga Basin Case Study – SWAT Model / INRM Consultants Pvt. Ltd. – 2012. URL: <https://swat.tamu.edu/>.
8. Opher T., Ostfeld A., Friedler E. Modeling highway runoff pollutant levels using a data driven model // *Water Science and Technology*. – 2009. – Vol. 60, issue 1. – P. 19–28. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2009.289>.
9. LIFE Project Reports on Skjern Restoration / European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/environment/life/>.
10. DHI India Project Overview (апрів проєктів). URL: <https://www.dhiindia.com/>.
11. Jaber F. H., Shukla S. MIKE SHE: Model Use, Calibration, and Validation // *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*. – 2012. – Vol. 55, issue 4. – P. 1479–1489. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=42255&t=1&redir=&redirType=>
<https://doi.org/10.13031/2013.42255>.
12. Kanclerz J., Agaj T., Gizińska K. Comparison of Two Hydrological Models, the HEC-HMS and Nash Models, for Runoff Estimation in Michałówka River // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, issue 10. – Art. 7959. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/10/7959>. <https://doi.org/10.3390/su15107959>.

13. Đukić V., Erić R. SHETRAN and HEC-HMS Model Evaluation for Runoff and Soil Moisture Simulation in the Jičinka River Catchment (Czech Republic) // *Water*. – 2021. – Vol. 13, issue 6. – Art. 872. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/6/872>.
<https://doi.org/10.3390/w13060872>.
14. Kolinyk I., Chaskovskyy O., Mokrytska O., Storozhuk O., Kryshtapovych V. Principles of Software and Information for Modeling Hydrological River Basins of the Ukrainian Carpathians // *Computer Design Systems. Theory and Practice*. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2024. – Vol. 6, No. 3. – P. 154–159. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/dec/37439/2518.pdf>.
<https://doi.org/10.23939/cds2024.03.154>.
15. Di Modugno M., Gioia A., Gorgoglione A., Iacobellis V., La Forgia G., Piccinni A. F., Ranieri E. Build-Up/Wash-Off Monitoring and Assessment for Sustainable Management of First Flush in an Urban Area // *Sustainability*. – 2015. – Vol. 7, issue 5. – P. 5050–5070. URL: <https://doi.org/10.3390/su7055050>.
16. Mangani G., Berloni A., Bellucci F., Tatàno F., Maione M. Evaluation of the Pollutant Content in Road Runoff First Flush Waters // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2005. – Vol. 160. – P. 213–228. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-005-2887-9>.
17. Osypov V., Osadcha N., Osadchyi V. SWAT Model Application for Simulating Nutrients Emission from an Agricultural Catchment in Ukraine // *Forum Geografic*. – 2016. – Vol. XV, Supplementary issue 2. – P. 30–38. URL: <https://forumgeografic.ro/wp-content/uploads/2016/s-2/Osypov.pdf>. <https://doi.org/10.5775/fg.2016.041.s>.
18. Osypov V., Osadcha N. SWAT Model Application for Simulating Nutrient Emission from Small Agricultural Catchment in the Desna River Basin (Ukraine) / *Project Management of Transboundary Rivers between Ukraine, Russia and the EU (MANTRA-Rivers)*. – Ukrainian Hydrometeorological Institute (UHMI), the State Service of Ukraine on Emergencies and National Academy of Science of Ukraine, 2017. – 23 p. URL: https://swat.tamu.edu/media/115742/g1-3-osypov.pdf?utm_source=chatgpt.com.
19. Сусідко М. М. Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем // *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. – 2000. – Т. 1. – С. 32–40.
20. Самойленко В. М. Математичне моделювання в геоекології: навчальний посібник [електронна версія]. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2003. – 233 с. URL: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/samojlenko_mat_mod.pdf.

21. Лобода Н. С. Гідрологічні прогнози: конспект лекцій. – Одеса: ОДЕКУ, 2008. – 172 с. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/8794/1/КЛ_Лобода%20Н.С._Гідрол_прогнози.pdf.
22. Жук В. М., Матлай І. І. Час поверхневої концентрації дощового стоку з лінійних в плані басейнів стоку при зміні похилу за степеневим законом // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 655: «Теорія і практика будівництва». – С. 83–88. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/524d9f91-123e-4b52-9995-31fabceb192b/content>.
23. Юрченко А. І. Методичні рекомендації щодо прогнозування надходження біогенних речовин та пестицидів з дифузних джерел сільськогосподарського походження до водних об'єктів // Інновації та науковий потенціал світу: матеріали III Міжнародної наукової конференції (м. Хмельницький, 10 листопада 2023 р.) / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2023. – С. 145–151. URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/10.11.2023/44>.
<https://doi.org/10.36074/mcnd-10.11.2023>.
24. Белей О., Штаєр Л. Вплив поверхневого стоку на формування паводкових вод // International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2022. – Vol. 1, issue 3. – Р. 37–51. URL: <https://isg-journal.com/isjea/article/view/14/j-isjea-20220103.4>.
<https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220103.4>.
25. Мисковець І. Я. Формування дощового стоку: теорія, методологія, розрахунки (на прикладі верхнього та середнього Подніпров'я): монографія. – Луцьк: ІВВ ЛНТУ, 2023. – 424 с. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2023-12/Монографія_Мисковець_2023_.pdf.
26. Кравчинський Р. Л., Хільчевський В. К., Корчемлюк М. В., Стефурак О. М. Моніторинг природних водних джерел Карпатського національного природного парку / За ред. В. К. Хільчевського. – Івано-Франківськ: «Фоліант». – 2019. – 124 с.
27. Осипов В. В., Спека О. С., Осадчий В. І., Осадча Н. М., Бончковський А. С. Прогнозування гідрографа водного стоку засобами SWAT (Soil and Water Assessment Tool) на прикладі басейну Десни // Доповіді Національної академії наук України. – Київ: Видавничий дім «Академперіодика», 2020. – № 9. – С. 98–107. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.09.098>.
28. Приходькіна В. С. Особливості максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг та його розрахункові характеристики: дис. ... д-р. філософії:

103 «Науки про Землю» / Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. – Київ, 2021. – 172 с. URL: https://old.uhmi.org.ua/spec_rada/docs/disertacia_prihodkina.pdf.

Светош В. Ю., здобувачка вищої освіти

Науковий парк «Алгоритм інновацій», м. Харків, Україна

ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ, ЯК КЛЮЧ ДО СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Актуальність теми полягає в тому, що глобальні кліматичні зміни, прискорене виснаження природних ресурсів та забруднення довкілля є одними з ключових викликів для світової спільноти. Транспортна галузь, яка спричиняє значну частину світових викидів парникових газів, потребує особливої уваги щодо екологізації. Хоча залізничний транспорт вирізняється вищою енергоефективністю та екологічною безпечністю у порівнянні з автомобільним і авіаційним транспортом, його вплив на довкілля все ще залишається вагомим. Використання дизельних локомотивів, масштабні роботи з будівництва та ремонту інфраструктури, шумове і вібраційне навантаження, а також забруднення ґрунтів і водних об'єктів у зоні залізничних шляхів потребують системних і довгострокових рішень.

Україна володіє однією з найбільших залізничних мереж у Європі, що робить цю сферу стратегічно важливою для економіки та національної безпеки. Водночас лише половина залізничної мережі країни електрифікована, а значна частина рухомого складу є морально застарілою[1]. У сучасних умовах відновлення держави та інтеграції до Європейського Союзу екологізація транспортної інфраструктури постає пріоритетним завданням, від якого залежить рівень енергетичної незалежності, конкурентоспроможності та якості життя населення.

Огляд досліджень. Світова практика демонструє, що залізничний транспорт має найвищий потенціал серед усіх видів транспорту для зменшення викидів CO₂. Дослідження життєвого циклу високошвидкісних залізничних мереж показують, що понад половину екологічного впливу становлять матеріали та енергетичні витрати на будівництво колій, мостів і тунелів[2]. Використання технологій повторної переробки матеріалів, екологічних цементів та сталі зі зниженим вуглецевим слідом здатне суттєво зменшити негативний ефект.

У сфері тяги ключовим напрямом розвитку є водневі поїзди. Сучасні потяги на паливних елементах працюють без прямого викиду шкідливих речовин, а їхня автономність дозволяє уникати дорогих інвестицій у контактні мережі на

малонаселених маршрутах. Паралельно розробляються гібридні технології, де поєднано акумулятори та водневі установки, що підвищує гнучкість перевезень.

Системи рекуперації енергії гальмування сьогодні застосовуються у високошвидкісних поїздах та метрополітенах. Вони дозволяють повертати в електромережу до третини енергії, витраченої на рух поїзда[3]. Ця технологія не лише зменшує вуглецевий слід, а й приносить економічний ефект.

Важливим напрямом розвитку є інтеграція відновлюваних джерел енергії в залізничну інфраструктуру. У багатьох країнах станції та депо обладнуються сонячними та вітровими електростанціями. Це дозволяє забезпечити енергією освітлення вокзалів, системи сигналізації та зарядні станції для електротранспорту.

Міжнародний досвід свідчить про доцільність масштабної електрифікації залізничних колій. Країни ЄС поступово відмовляються від дизельних локомотивів, роблячи ставку на електропоїзди та енергоефективну інфраструктуру. Швейцарія вже електрифікувала 100% залізниць, а Франція, Німеччина та Італія мають показники понад 60%[4].

Основними завданнями дослідження є оцінка чинників негативного впливу залізниці на довкілля, зокрема викидів, шуму, забруднення ґрунтів та вод, вивчення міжнародного досвіду у впровадженні електрифікації, водневих поїздів, гібридних технологій та відновлюваних джерел енергії, аналіз економічних, правових і технологічних механізмів екологізації галузі, а також розробка пропозицій для України щодо модернізації інфраструктури та інтеграції в європейську транспортну мережу.

Аналіз екологічного впливу залізничного транспорту доцільно здійснювати у комплексному вимірі, враховуючи енергоспоживання, особливості будівництва та експлуатації інфраструктури, локальні екологічні проблеми, а також потенціал сучасних технологічних рішень. Однією з ключових проблем є використання дизельних локомотивів, що залишаються основним джерелом викидів вуглекислого газу, оксидів азоту, діоксиду сірки та дрібнодисперсного пилу. Близько половини залізничних ліній України досі не електрифіковано, що зумовлює залежність від дизельного палива та підвищує антропогенне навантаження на довкілля. Для порівняння, у країнах Європейського Союзу понад 60% залізниць електрифіковано, а у Швейцарії цей показник досягнув 100%, що свідчить про реальну можливість відмови від дизельної тяги.

Важливим чинником негативного впливу залізничної галузі є будівництво та ремонт інфраструктури, що супроводжуються значними матеріальними та

енергетичними витратами. За результатами досліджень, 40–60% вуглецевого сліду залізничного транспорту формується саме на етапі зведення та оновлення об'єктів. Використання вторинних матеріалів і впровадження принципів екологічного проєктування дозволяють знизити цей показник на 20–30%. Водночас локальні екологічні проблеми залишаються актуальними: забруднення ґрунтів важкими металами, гербіцидами та залишками паливно-мастильних матеріалів фіксується вздовж залізничних колій, що негативно позначається на стані земельних і водних ресурсів та вимагає запровадження сучасних систем моніторингу й рекультивації.

Суттєвий потенціал для екологізації залізничного транспорту мають інноваційні технологічні рішення. Водневі поїзди, прикладом яких є Alstom Coradia iLint, довели ефективність у досягненні нульових викидів і можуть стати перспективними для малонаселених маршрутів в Україні. Гібридні системи, що поєднують акумуляторні батареї та паливні елементи, забезпечують автономність руху без потреби у контактній мережі. Впровадження технологій рекуперативного гальмування сприяє скороченню витрат електроенергії на 20–30%[5]. Використання відновлюваних джерел енергії, зокрема встановлення сонячних електростанцій на вокзалах і в депо, зменшує навантаження на централізовану мережу, а цифровізація процесів і автоматизовані системи управління рухом підвищують ефективність перевезень та знижують рівень викидів.

Україна вже здійснює кроки у напрямі екологізації галузі. Відкриття у 2025 році колії європейського стандарту Ужгород–Чоп стало важливим етапом інтеграції у транспортну систему Європейського Союзу [6]. Подальші проєкти зеленої реконструкції передбачають масштабну електрифікацію залізничних ліній, модернізацію вокзалів, оновлення локомотивного парку та впровадження інноваційних технологій. Водночас екологічна модернізація залізничної інфраструктури неможлива без належного правового та економічного забезпечення. Посилення екологічних стандартів у національному законодавстві та фінансова підтримка міжнародних організацій, зокрема UNIDO, ЄБРР та ЄІБ, які спрямовують інвестиції у розвиток транспортної інфраструктури за умови впровадження екологічних рішень, створюють підґрунтя для системних змін.

Таким чином, комплексний аналіз демонструє, що екологізація залізничного транспорту України є не лише технічно можливою, але й економічно та стратегічно доцільною в умовах інтеграції до європейського простору.

Висновок

Залізниця — це транспорт майбутнього, який має потенціал стати основним засобом декарбонізації перевезень. Екологічні технології, такі як електрифікація, водневі поїзди, рекуперація енергії, використання ВДЕ та цифрові системи управління, дозволяють створити екологічно чисту, ефективну та безпечну транспортну систему. Україна має унікальну можливість поєднати модернізацію залізничної інфраструктури з інтеграцією у європейський простір [7]. Реалізація проєктів зеленої реконструкції та масштабне впровадження інновацій допоможуть зменшити залежність від викопних ресурсів, знизити рівень забруднення та зробити українську залізницю рушієм сталого розвитку.

Література

1. Рибіна О. І. Організаційно-економічні основи сталого розвитку залізничного транспорту України. — К., 2013. — С. 164–166.
2. Запорожець О. І., Бойченко С. В., Матвеева О. Л., Шаманський С. Й., Дмитруха Т. І., Маджд С. М. Транспортна екологія : навч. посіб. — Київ : НАУ, 2017. — С. 110–118.
3. Danchenko Y., Bosak P., Shukel I., Popovych V. Railway infrastructure of Ukraine as a factor of soil chemical hazard / Vilnius Tech, 2023. [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://vilniustech.lt/files/5100/255/12/3_0/-873.pdf
4. de Bortoli A., Bouhaya L., Feraille A. A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France : arXiv preprint, 2025. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2501.10458>
5. UNIDO. The National Guiding Framework for Standards and Technical Regulations for the Green Reconstruction of Ukraine, 2025. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2025-02/The-National-Guiding-Framework-for-Standards-and-Technical-Regulations-Underpinning-green-reconstruction-of-Ukraine.pdf>
6. EIB. Ukraine opens its first railway line with European track width standard, 2025. <https://euneighbourseast.eu/news/latest-news/ukraine-first-european-gauge-railway-track-opens-with-eu-support/#:~:text=September%20%2C%202025-,Ukraine%3A%20first%20European%20gauge%20railway%20track%20opens%20with%20EU%20support,Chop%20on%20the%20Hungarian%20border.>
7. Хатнюк Ю. А. Поняття та суть екологічної безпеки у діяльності залізничного транспорту в Україні / Львів , 2021. — С. 7–10.

Солодовнікова Л. М., канд. техн. наук, завідувач лабораторії;
ДНУ «НТК «Інститут монокристалів» НАН України, м. Харків, Україна.

Тарасов В. О., д-р фіз-мат. наук;
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, м. Харків, Україна

Маркіна Н. К., ст. наук. співр, завідувач лабораторії
Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна.

РАДОНОНЕБЕЗПЕКА ПІДЗЕМНИХ ЗАХИСНИХ СПОРУД ТА ПІДЗЕМНИХ ШКІЛ

Введення

Дослідження негативного впливу воєнних дій на навколишнє природне середовище та оцінка небезпечних ризиків для життя та здоров'я людини на теперішній час є вкрай важливим. Вся територія України страждає від постійних обстрілів та їх наслідків. Використання в ході бойових дій різного типу озброєння приводить до механічного і хімічного забруднення компонентів довкілля важкими металами, нафтопродуктами та іншими токсичними речовинами, зокрема, радіаційними сполуками. Ці процеси мають негативний вплив на стан навколишнього природного середовища в цілому, і є особливо небезпечними для життя та здоров'я людини. Постійні обстріли території України привели до необхідності будівництва підземних захисних споруд та шкіл. У зв'язку з цим, для безпечного перебування людей в цих об'єктах важливим питанням є дослідження їх радононебезпеки.

Актуальність. Військові дії на території України постійно тривають з 24 лютого 2022 року й по теперішній час. У зв'язку з тим, що значна частина території України розташована на кристалічному щиті з великим вмістом урану-238 та торію-232, та враховуючи те, що ґрунт має пористу структуру, спостерігаються інтенсивні еманції радіоактивних газів радону-222 та торону-220 з поверхні землі та їх накопичення в підземних житлових та промислових спорудах. Визнано в світі, що найбільший внесок в формування індивідуальної ефективної еквівалентної дози опромінення населення від земних джерел радіації вносить радон-222 разом зі своїми дочірніми продуктами розпаду (близько 74%) [1]. Критичною групою населення щодо опромінення радоном є діти. Формування доз опромінення дітей обумовлено меншими розмірами тіла та органів, зокрема легень, особливостями обміну речовин (організм, що росте), більшою

радіочутливістю органів і систем організму дитини. Максимальну дозу опромінення діти одержують у віці близько 6 років. Ризик розвитку раку легень внаслідок опромінення радоном у дітей віком від 10 до 14 років – у 1,5 – 3 рази вищий, ніж у дорослих. Тому, актуальним завданням в умовах воєнних дій є визначення рівня радононебезпеки в підземних захисних спорудах та підземних школах та розробка оперативних заходів по зниженню радіаційного навантаження від радону-222 на дітей [2].

Основна частина.

Показником радононебезпеки є об'ємна активність радону-222 у повітрі. Цей показник безпосередньо вказує на ступень небезпеки потрапляння радону до організму і його внутрішнього опромінення. Відповідно до Норм радіаційної безпеки України, нормативною величиною є середньорічна еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА) радону в повітрі приміщень, яка не повинна перевищувати 50 Бк/м³ для новобудов і реконструйованих будівель, а також дитячих, санаторно-курортних та лікувально-оздоровчих закладів, та 100 Бк/м³ для будівель, що експлуатуються [3].

Найсильнішого впливу радону людина зазнає в закритому, не провітрюваному приміщенні. Концентрація радону в закритих приміщеннях у середньому у 8 разів вища, ніж у повітрі назовні. Джерелами радону в підвалах та приміщеннях є ґрунт під фундаментом будівлі та біля нього, будівельні матеріали та огорожувальні конструкції (стіни, фундамент, перегородки), система внутрішнього водопостачання будівлі (особливо артезіанські свердловини та колодязі) [2]. Потрапляння радону в будівлю показано на рис.1.

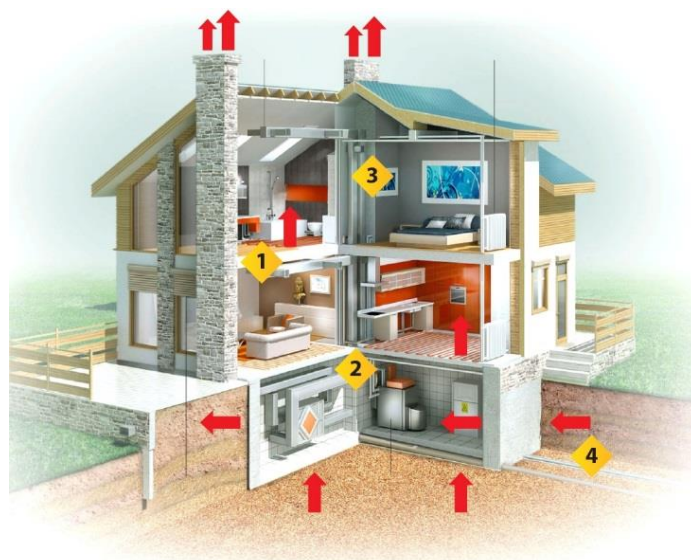


Рисунок 1 – Потрапляння радону в будівлю
1. Шпори в підлозі, 2. Шпори в кладці,

3. Система вентиляції, 4. Підведення комунікацій

Величини значень об'ємної активності радону в приміщеннях різного типу (будівлі, підвали та інше) залежить від інженерно-планувального рішення і характеристик стану приміщення, режиму його вентилявання, кількості часу перебування у ньому людей та від погодних і кліматичних умов. Взимку об'ємна активність радону значно вища, ніж влітку, тому що вікна і двері щільно закриті, це зменшує вентилявання приміщень. Об'ємна активність радону може бути абсолютно різною навіть у сусідніх будівлях й змінюватися щодня і щогодини.

У зв'язку з постійними обстрілами території України, у прифронтових областях постійно діють підземні захисні споруди та для безпечного навчання дітей збудовано 33 підземні школи, а до кінця року планується звести 156 підземних шкіл-укриттів, у 2026 — ще 47. У Харкові з першого вересня 2025 року школярі відвідують офлайн-заняття у сімох підземних школах, метрошколі на шістьох станціях метрополітену та в сертифікованих укриттях при навчальних закладах. З 1 січня 2026 року планують відкрити ще три підземні школи, нині триває будівництво.

У серпні 2023 року до Закону України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» (Верховна Рада України, 1998) були внесені зміни відповідно до вимог нової системи радіаційного захисту та реформ децентралізації, які були здійснені в попередні роки. Стаття 10 цього закону віднесла до компетенції місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування функції забезпечення радіаційного захисту населення, інформування про радіаційні ризики, запровадження відповідних програм. Такі компетенції вимагають від державних органів влади забезпечення територіальних громад відповідними інструментами, що дозволяють реалізувати ці вимоги на практиці, а саме: низкою нормативно-правових документів (методичних рекомендацій, вказівок, інструкцій тощо), які містять алгоритми дій щодо вимірювання радону в повітрі, перелік та пояснення можливих захисних заходів тощо. Так, з метою визначення радіаційних ризиків для населення від радону необхідно правильно спланувати дослідження, забезпечити його репрезентативність (вибірка, доцільна кількість вимірювань тощо) для подальшого оцінювання рівнів опромінення, мати методики встановлення-зняття радонометрів, провести інтегральні вимірювання, визначити відповідні ефективні дози, розрахувати величину ризиків, дати рекомендації щодо протирадонових заходів [4].

У зв'язку з вищевказаним, перебування дорослих і особливо дітей в підземних захисних спорудах та в підземних школах вносить ризики їх опромінення від

радіоактивного газу радону-222. Тому, для запобігання шкоди здоров'ю дорослих та дітей потрібно дослідити рівень радононебезпеки в підземних захисних спорудах та підземних школах, та розробити заходи щодо усунення цих ризиків [5].

Технічне забезпечення моніторингу радону-222 в повітрі може бути забезпечено засобами вимірювання, що реалізують різні методи реєстрації α -частинок, що випромінюються радоном-222 при радіаційному розпаді природного урану-238 (рис. 2)

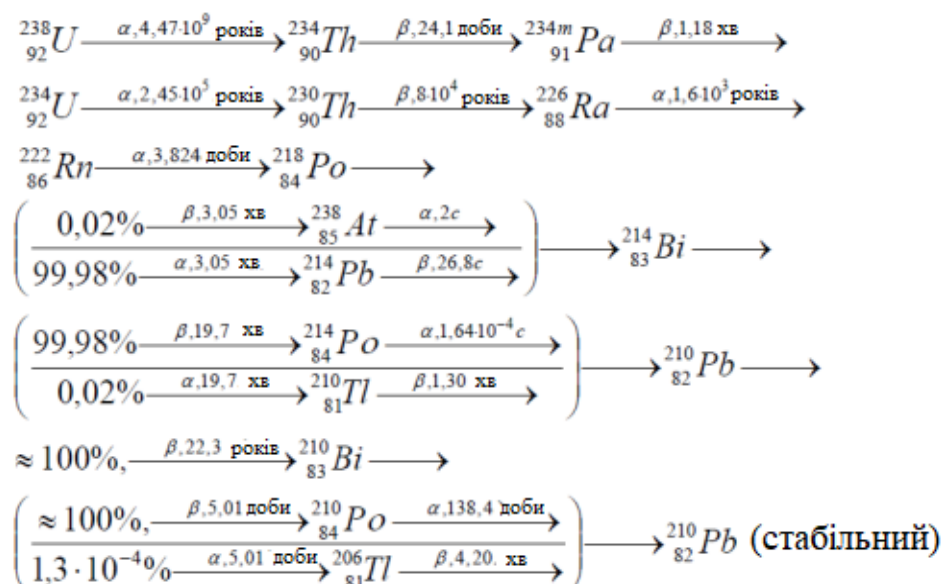


Рисунок 2 – Схема розпаду природного урану-238

Найпоширенішими методами вимірювання об'ємної активності радону-222 в повітрі є: метод трекових детекторів, сцинтиляційний метод, метод імпульсної іонізаційної камери, метод напівпровідникових детекторів, метод електретної камери, метод адсорбції радону на активованому вугіллі (метод вугільних адсорбентів).

Враховуючи те, що вимірювання об'ємної активності радону-222 необхідно проводити в закритих приміщеннях, особливо підвальних, для визначення середньорічного рівня об'ємної активності радону в повітрі підземних захисних споруд та підземних шкіл оптимальним є використання інтегрального метода (метода трекових детекторів), який характеризується тим, що тривалість вимірювання повинна бути не меншою за 30 діб.

В якості матеріалів для трекових детекторів можуть бути використані ряд полімерних матеріалів різного складу, здатних реєструвати заряджені частинки. Для реєстрації легких ядер і альфа-частинок найбільш широко застосовуються нітроцелюлозні і полікарбонатні плівки. Прилади з трековим (плівковим) детектором (рис. 3) встановлюють у тих приміщеннях, де діти та дорослі проводять час найдовше. Після закінчення терміну експонування (не менше

30 діб), радонові накопичувачі відправляють у вимірювальну лабораторію, де плівкові детектори піддаються хімічній обробці (травленню). Після цього за допомогою вимірювального приладу (рис. 4) проводиться підрахунок треків (слідів пошкодження) на детекторі, що залишили альфа-частинки. За кількістю треків розраховується об'ємна активність радону-222 [2, 6].



Рисунок 3 – Радоновий накопичувач



Рисунок 4 – Вимірювальний прилад

Для миттєвих визначень об'ємної активності радону-222 в приміщеннях підземних захисних споруд та підземних шкіл оптимальним є використання приладів, в яких реалізовано сцинтиляційний метод.

Сцинтиляційний метод вимірювання радону-222 в повітрі заснований на тому, що підраховується кількість сцинтиляцій, що виробляються паралельним пучком альфа-променів

на екрані з поглинаючою речовиною (сцинтилятором), розміщених на різних відстанях x від джерела випромінювання.

Еманаційний альфа-сцинтиляційний лічильник являє собою фотоелектронний помножувач (ФЕП), до якого оптично приєднана спеціальна камера для зміни еманцій. Камера являє собою циліндр з одним або двома вакуумними кранами, закритий з одного боку стеком. Діаметр циліндра повинен дорівнювати діаметру ФЕП. Для зменшення втрат світла застосовують камери, що мають форму усіченого конуса. Чутливість таких камер на 10-15% вища за чутливість циліндричних. Внутрішню поверхню камери покривають сцинтилятором, активованим сріблом. Спектр висвітлення активованого сцинтилятора відповідає спектральній чутливості фотопомножувача з сурміно-цезієвим катодом, використання якого дозволяє починати вимірювання відразу ж після світлоізоляції камери. Натуральний фон камери відповідає значенню від 1 до 3 імп/хв (у кращому випадку від 0,2 до 0,3 імп/хв) і залежить від забруднення альфа-випромінюючими радіоактивними елементами стінок камери і скла. Зниженню фону камери сприяє заміна скла кварцом або органічним склом, покриття її стінок товстим шаром $ZnS (Ag)$. Швидкість підрахунку альфа-частинок камерою залежить від нижнього порогу дискримінації схеми. Зміна рівня дискримінації на 1в змінює швидкість підрахунку на 1,1% .

Для вимірювання активності радону та його ізотопів застосовують рідкі сцинтилятори. Кількість і концентрацію радону в пробах визначають за зареєстрованою швидкістю підрахунку, що створюється альфа - випромінюванням радону або продуктами його розпаду. В останньому випадку підвищуються чутливість методу і точність вимірювань [6].

Сцинтиляційний метод реалізований в таких засобах вимірювання: РГА-09 (АОЗТ «Тетра», м. Жовті води), PYLON PMT-TEL («PYLON», Канада), RAM-31`система «RADOS» (США).

Слід зазначити, що коректні оцінки об'ємної активності радону-222 у повітрі приміщень підземних захисних споруд та підземних шкіл можливі завдяки калібруванню засобів його вимірювання.

Калібрування засобів вимірювання радону-222, які використовуються в приміщеннях підземних захисних споруд та підземних шкіл, здійснюється на Державному первинному еталону об'ємної активності радону-222 (ДЕТУ 12-01-11), в склад якого входить еталонне джерело радону-222, створене на основі стандартного зразка низькофонової уранової руди УР-768С. На базі ДЕТУ 12-01-11 розроблена і впроваджена Державна перевірна схема (ДСТУ 3536-97), яка забезпечує перевірку засобів вимірювань радону, необхідних для визначення рівня радонебезпеки

приміщень підземних захисних споруд та підземних шкіл [7,8].

Таким чином, у зв'язку з існуючими змінами в законодавстві України та загрозами опромінювання від радону-222 особливо дітей, які проводять багато часу в приміщеннях підземних захисних споруд та підземних шкіл, необхідно впровадити обов'язковий моніторинг радону-222 цих об'єктів та розробити і запровадити відповідні протирадонові заходи, згідно з результатами моніторингових досліджень.

Література

1. Л. М. Солодовнікова, В. О. Тарасов, В. М. Зубер, Ю. М. Сорока, Н. Д. Сізова Методичні аспекти оцінки і зниження рівня радононебезпеки сховищ радіоактивних відходів, (2020), Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ», Серія інноваційні [дослідження у наукових роботах студентів, № 6 \(1360\), 110-117](#)
2. <https://www.uatom.org/oprominennya-radonom>
3. Норми радіаційної безпеки України. Доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Затверджено Постановою Головного державного санітарного лікаря України від 12.07.2000. № 116. К., 2000. 25 с.
4. Павленко Т.О., Фризюк, М.А. Державний план заходів щодо радону методичне забезпечення його реалізації, (2024), Медична фізика, сучасний стан, проблеми, шляхи розвитку. Новітні технології, 11, 110-117
5. Верховна Рада України. (1998). Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання (закон України від 17.09.2023, № 15/98-ВР, підстава 3344-ІХ). Відомості Верховної Ради України, 1998, № 22, ст. 115. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Tex>
6. ДСТУ ІЕС 61577-1:2008 Прилади радіаційного захисту. Прилади вимірювання радону та продуктів його розпаду. Частина 1. Загальні принципи (ІЕС 61577-1:2006, IDT). [Чинний від 2008-09-03]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018, 13 с.
7. ДЕТУ 12-01-11 Державний первинний еталон одиниці об'ємної активності радону-222.
8. ДСТУ 3536-97. Метрологія. Государственная поверочная схема для средств измерений объёмной активности радона-222. [Чинний від 1997-04-18]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1997. 8 с.

Стеблева А. В., здобувач вищої освіти

Науковий парк «Алгоритм інновацій»», м. Харків, Україна

РЕЦИКЛІНГ ВІДХОДІВ БУДІВНИЦТВА ТА ДЕМОНТАЖУ

Актуальність теми полягає в тому, що наразі будівельні відходи становлять велику частку промислового сміття, що створює значний екологічний та економічний тиск.

У сучасних умовах, зокрема через масштабні руйнування, спричинені бойовими діями, проблема утилізації будівельних відходів набуває особливої гостроти, бо вивезення сміття на полігони стає все більш неефективним через зростання кількості відходів та обмеженість площ для захоронення.

Розвиток технологій рециклінгу будівельних матеріалів є важливим напрямком сталого розвитку, адже сприяє зниженню антропогенного тиску, раціоналізації використання природних ресурсів та скороченню собівартості будівельних робіт.

Огляд досліджень. У роботах останніх десятиліть питання переробки та утилізації будівельних відходів досить активно вивчаються. У дослідженнях наголошується, що основним методом переробки інертних будівельних матеріалів (бетон, цегла, асфальт, кераміка) є їх подрібнення та сепарація [1]. Ці технології сприяють отриманню якісних вторинних матеріалів для використання у будівництві.

Частина досліджень має зосереджену увагу на післявоєнну відбудову [1, 2]. У цьому контексті рециклінг має не лише екологічне значення, а й стратегічну необхідність, бо сприятиме прискоренню процесу відновлення та зменшенню витрат.

Експерти, дослідники у своїх дослідженнях аналізують походження та застосування будівельних відходів, розподіляють їх за різними критеріями, вивчають системні питання щодо організації переробки та подальшого використання будівельних відходів, що може сприяти ефективній реконструкції зруйнованих міст у рамках державної післявоєнної програми.

Крім того, у низці робіт розглядається нормативно-правове забезпечення процесів утилізації та переробки, зокрема стандарти якості вторинних матеріалів, вимоги до екологічної безпеки та заохочення будівельних компаній щодо використання рециклінгових матеріалів. Цей підхід допомагає створенню цілісної системи управління будівельними відходами, що охоплює всі етапи — від генерації

відходів до їх повторного використання, і особливо важливо в умовах післявоєнного відновлення та розвитку циркулярної економії.

Мета дослідження полягає в аналізі впливу рециклінгу будівельних відходів на ефективність використання ресурсів, екологічну безпеку та розвиток післявоєнного будівництва, виявленні переваг повторного використання вторинних матеріалів у порівнянні з традиційними методами та визначенні перспектив створення ефективної системи управління будівельними відходами.

Завдання дослідження полягає у вивченні сучасних підходів та технологій переробки будівельних відходів. В рамках дослідження необхідно: визначити основні види будівельних відходів та їх характеристики; проаналізувати ефективність технологій подрібнення, сортування та повторного використання матеріалів; оцінити екологічні та економічні переваги рециклінгу у порівнянні з традиційними методами; розробити рекомендації щодо формування комплексної системи управління будівельними відходами.

Аналіз. Сучасні обсяги збору, вивезення та утилізації різних видів відходів, зокрема будівельних, перетворюються на глобальну проблему. Наявні полігони та звалища вже майже заповнені, що негативно впливає на стан довкілля. Водночас розвиток інноваційних будівельних технологій та поява компаній, що пропонують сучасні та економічно ефективні будівельні системи, створюють передумови для впровадження комплексних рішень з управління відходами та їх повторного використання. Згідно однієї з вимог Регламенту (ЄС) №305/2011, будівлі та споруди повинні бути запроєктовані, побудовані і знесені таким чином, щоб використання природних ресурсів було раціональним і забезпечувало, зокрема: можливість повторного використання або переробки конструкцій будівель і споруд, їх матеріалів і частин після знесення; довговічність будівель і споруд; можливість використання екологічно сумісних сировинних і вторинних матеріалів у будівлях і спорудах [4]. Будівельні відходи класифікують на кондиційні (придатні для повторного використання), некондиційні (потребують переробки) та сміття (5%, підлягає захороненню). Основні методи переробки включають механічне подрібнення бетону для отримання щебеню, регенерацію асфальту, переробку пластмас та деревини у паливні брикети, плити OSB або сировину для хімічної промисловості [4]. Таким чином, поєднання регуляторних стимулів, технологічних інновацій та економічної доцільності робить перехід до циркулярної економіки в будівництві не лише необхідним, але й абсолютно досяжним

За приблизними оцінками фахівців, на сьогодні в Україні накопичено мільйони тонн металовмісних відходів чорної та кольорової металургії, а також хімічної промисловості, гірничодобувного та енергетичного секторів, і їхні обсяги продовжують зростати. Щороку в країні утворюється понад мільярд тонн відходів виробництва та споживання, проте лише 10–

15% з них повторно використовуються як вторинні матеріальні ресурси. Для складування відходів відведено близько 160 тис. гектарів, а їх загальний обсяг перевищує 25 млрд тонн. Витрати на зберігання відходів іноді сягають понад 20% собівартості продукції. Темпи накопичення шкідливих забруднювачів та їхній вплив на здоров'я людей і стан навколишнього середовища в Україні значно перевищують показники, характерні для розвинених країн [4]. Ця ситуація підкреслює нагальну необхідність розвитку ефективних технологій переробки та повторного використання промислових відходів. Впровадження системи рециклінгу допоможе не лише знизити негативний екологічний вплив, а й раціонально використовувати обмежені ресурси країни. Тільки комплексний підхід до управління відходами здатен забезпечити сталий розвиток промисловості та безпеку навколишнього середовища.

В умовах масових руйнувань від війни в Україні критично важливим стало управління будівельним сміттям. Відповідно до Національної стратегії до 2030 року, 20 червня 2022 року було прийнято новий базовий закон «Про управління відходами», а Кабінет Міністрів затвердив спеціальний порядок поводження з відходами від руйнувань. Світовий досвід доводить, що ефективне вирішення цієї проблеми можливе лише на державному рівні: у багатьох країнах заборонили нові звалища, а висока вартість утилізації на полігонах робить переробку економічно вигідною. Наприклад, в ЄС з щорічних 200 млн тонн будвідходів переробляють 72% [3]. В Україні понад 500 компаній спеціалізуються на переробці будівельних відходів, але їхні потужності завантажені не повністю. Головними проблемами галузі залишаються низький попит на вторинну сировину, брак спеціалізованої техніки та недовершений нормативно-правовий фундамент [3]. Дослідження показують, що основним способом переробки поки що є механічне дроблення та подрібнення, завдяки чому отримують щебінь, пісок і цементний шлак для будівництва.

Одночасно розвиваються й інноваційні методи — хімічна та термічна переробка, що дають змогу виробляти в'язучі матеріали та альтернативне паливо. Важливу роль відіграє впровадження цифрових систем обліку, які підвищують ефективність збору та переробки відходів. Експерти вважають, що поєднання державної підтримки, інвестицій у переробку та екопросвіти допоможе зменшити обсяги сміття та підвищити екологічну безпеку [3]. Отже, Україна поступово переходить від звичайного захоронення відходів до їх повторного використання, що стає ключовим для сталого розвитку та відбудови інфраструктури після руйнувань.

Для вирішення проблеми необхідно створити інституційну систему управління відходами, розробити нормативну базу та запровадити принципи відповідальності виробників і пріоритету переробки над захороненням. Це дозволить економити ресурси, зменшити забруднення та стане основою для сталого відновлення країни.

Висновок

Аналіз потенціалу рециклінгу будівельних відходів демонструє, що їх ефективне використання є важливою умовою для сталого розвитку будівельної галузі та відновлення України. Традиційне поховання будівельного сміття на полігонах формує значне навантаження на навколишнє середовище, спричиняючи забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосферного повітря. Впровадження технологій переробки будівельних відходів дозволяє не тільки скоротити обсяги сміття, але й істотно зменшити видобуток первинних природних ресурсів.

Рециклінг будівельних матеріалів демонструє відчутні переваги перед традиційними методами утилізації. Відсутність необхідності у нових звалищах, зменшення транспортних викидів та економія енергії на виробництві нових матеріалів сприяють зниженню антропогенного впливу на довкілля та поліпшенню екологічної ситуації в регіонах.

Таким чином, поступова відмова від традиційного поховання будівельних відходів і перехід до циркулярної економіки в будівництві створюють реальні передумови для значного поліпшення стану навколишнього середовища, підвищення рівня екологічної безпеки та забезпечення раціонального використання ресурсів для нинішніх і майбутніх поколінь.

Література

1. Донченко О. С. Використання відходів пошкодження (руйнування) будівель і споруд внаслідок бойових дій для рекультивації техногенно-порушених територій: пояснювальна записка до дипломної роботи ОС «Магістр». Дніпро: ДДАЕУ, 2020. 45 с. Режим доступу: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/11187>
2. Курепін В. М. Рециклінг та утилізація будівельних відходів в Україні: виклики та перешкоди // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2024. С. 192-197.
3. Шишкін Е. А., Гайко Ю. І., Черносова Т. О. Шляхи рециклінгу будівельного сміття під час післявоєнної відбудови зруйнованих міст. *Збірник наукових праць "Містобудування та територіальне планування"*. Харків, 2024. Вип. 54. С. 679–697. - Режим доступу: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.679-697>
4. Е. А. Шишкін, Ю. І. Гайко, К. І. Вяткін, А. О. Чала Рециклінг будівельних *Збірник наукових праць "Містобудування та територіальне планування"*. Харків, 2018. Вип. 66. С. 654-665. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2018_66_77

5. Будівельні та демонтажні відходи: проблеми та шляхи утилізації: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції / [редкол.: О. М. Петренко та ін.]. – Житомир : ЖДТУ, 2021. 215 с. - Режим доступу: <https://eztuir.ztu.edu.ua/handle/123456789/829>

Serhii Telyma PHD (Engin.), Senior Research Scientist;

Olexandr Diatel, PHD (Engin.)

Institute of Hydromechanics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ABOUT THE OXYGEN INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF THE WASTEWATERS TREATMENT FROM ORGANIC POLLUTIONS IN BIOREACTORS

Introduction

In biological wastewater treatment reactors in particular in aerotanks the removal of organic contaminants (OC) occurs in aerobic conditions that is when oxygen is consumed for biooxidation of OC and self-oxidation of cell material and also used in other processes that may occur at this time. Therefore, the modeling and development of the aeration system consist in providing such an oxygen regime in the reactor in which the rate of the biological treatment process should not be limited by the amount of oxygen contained in the reactor. In such reactors the processes of dissolution and consumption of oxygen occur simultaneously and are interconnected and under normal conditions OC removal occurs only at the expense of suspended biocenosis (active sludge).

Main Part

In this paper the peculiarities that occur in the modeling of the oxygen regime at the aerobic biological treatment of the wastewaters in aerotanks with suspended and fixed biocenosis are considered.

The aim of the work is to develop the mathematical model for evaluation and analyze of the oxygen regime in aerotanks-mixers and aerotank-displacers under given conditions on the base of corresponding equations of the material balance recorded relative to the concentration of oxygen C .

To achieve the goal the following prerequisites were taken into account:

- the limiting cases of aerotanks work in the system of biological wastewaters treatment were considered;
- at evaluation of the removal of the OC the linear kinetics of reactions of the first and the zero orders according to Monod were used

The removal of organic contaminants by suspended and fixed biocenosis in aerotanks must ensure uninterrupted supply of oxygen for growth and livelihoods of the

microorganisms and control of its consumption in the amount necessary to maintain the kinetics of reactions with a high rate of utilization of OC in the given conditions of the aerobic process. The proposed models are as

- for aerotank - mixer

$$W_p \frac{\partial C_a}{\partial t} = Q_a (C_0 - C_a) + W_p \alpha K_C a (\beta C_p - C_a) - F_{\delta_l} N_c - R_{a_c} W_p, \quad (1)$$

- and for the aerotank – displacer

$$\varepsilon \frac{\partial C_a}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_a}{\partial x} + \varepsilon \alpha K_C a (\beta C_p - C_a) - \frac{F_{\delta_l}}{W_p} N_c - R_{a_c}, \quad (2)$$

$$R_{a_c} = R_{c_a} + R_{c_c}.$$

In practical calculations it is enough to consider equations (1)-(2) in stationary conditions and to evaluate their members taking into account the known diffusion criterion

of Peckle $Pe = \frac{vl}{D_c}$ according to [1,7,8,9,10].

In the above equations in the general case the value of the flow of oxygen entering into the biofilm through its surface is determined by the equation:

$$N_c = -D_c \frac{dC}{dz} = (1-\eta)K_C (C_a - C|_{z=0}) + \eta \alpha K_{Cn} (\beta C_p - C|_{z=0}), \quad (3)$$

where η – the ratio of the surface area of the biofilm when in contact with air bubbles to the total surface area of the biofilm.

In other words, the equation (3) takes into account the possible additional flow of oxygen into a biofilm both from the volume of liquid in the form of dissolved oxygen and as a result of the so-called inter-surface transfer (IST) directly from the bubbles adhered to the biofilm. In the case when $\eta = 0$ the flow of dissolved oxygen from the volume of liquid to the biofilm due to diffusion [1,2,5,6]:

$$N_c = -D_c \frac{dC}{dz} = K_C (C_a - C|_{z=0}). \quad (4)$$

Note that the determination of the flow of oxygen through the surface of the biofilm N_c is as a result of solving the following equation which characterize the consumption of oxygen in the removal of OC by a fixed biocenose (biofilm):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - R_c \quad (5)$$

So, for practical calculations the solution of equation (5) is sufficient to solve for stationary conditions that occur fairly quickly that is when $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$.

The solution of equation (5) is performed under the following boundary conditions, namely: $N_c = 0$ for $z = 0$, and $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$ for $z = \delta$ which allows us to determine the change in the concentration of oxygen in the thickness of the biofilm l and in subsequent calculations for determination of the concentration on the surface of the biofilm $C|_{z=0} = C\delta$

In the above equations and dependencies C, C_δ, C_a, C_0 – are respectively the concentration of oxygen in the biofilm, on the surface of the biofilm, in the aerotank and in the wastewaters at the entrance to the aerotank; C_p – concentration of saturation (soluble) oxygen in the liquid; R_c, R_{a_c} – the rate of reactions of using oxygen in a biofilm and aerotanks, taking into account the oxidation velocity of the isolated substances during the death of microorganisms; W_a, W_p, W_δ – respectively the aerotanks working volume, the volume of the liquid in the aerotank, the volume of the elements of the established loading with the fixed biocenose; $F_{\delta l}, F_\delta$ – respectively the total surface area of the biofilm in the aerotank (reactor) and the surface area of the oxygen in the biofilm; $K_C a, K_{cn}, K_C$ – respectively the volumetric mass transfer coefficient, the coefficient between the surface transfer of oxygen in biofilm, mass transfer coefficient of oxygen in liquid film [1,3,4,7,8].

Thus, the implementation of the proposed models allows with known geometric and other characteristics of biofilm to evaluate the influence of oxygen regime on the processes of treatment in aerotanks in different conditions of their operation and to substantiate an economical and efficient technological supply system with oxygen taking into account the features of extraction of OC in aerotanks with suspended and fixed biocenosis. In this case it is possible to substantiate the criteria in which the biochemical oxidation process will be adequately supplied with oxygen that is will not limit on the kinetics of biooxidation both suspended and fixed biocenosis [1,2,7,9,10,11].

Conclusions

In a result of conducted analysis, it is possible to make the conclusion that the removal of organic pollutions and others ones may be improved substantially in the different bioreactors by the arranging of the fixed biocenosis as a biofilm with the high

microorganism's concentration. For solution of the wastewater's problems the bioreactors-mixers and bioreactors-displaser are used in many cases now in which the removal of organic pollutions is realized by the suspended biocenosis and using of the additionally biofilm technology allows to increase the efficiency of the exploitation of given types constructions at the wastewater's treatment. Development of the calculative methodic of the parameters of the joint wastewaters treatment by biofilm will be most substantiated if it based on the general mathematical model's realization. At creation of the such models it is necessary in first to take into account on the heterogeneous structure of biofilm, its dimensions, oxygen regime and correspond balance equations of kinetic reactions. During the valuation of the oxygen influence on the oxidation process ammonium to nitrate the relation $O_2/ N-NH_4$ is proposed. This parameter is the better alternative of the control at nitrification in the bioreactor in comparison with oxygen concentration. Oxygen is the main parameter which controls and limits nitrification in biofilm. If the values of given relation in the different points of biofilm is 0.05-0.1 then the conversion about 80% of ammonium to nitrite have a place. Using of the proposed relation at the practical calculations allows to regulate the wastewaters treatments processes and to improve the efficiency of bioreactors exploitation.

References

1. Oliynik O.J., Airapetian T.S. (2015) Modelling of the wastewater treatment from organic contaminations in the bioreactors-aerotanks with suspended (free flowing) and fixed biocenosis. Reports of National Academy of Sciences of Ukraine. №5. 56-61 (in Ukrainian).
2. Maslun G.S. (2013) Practical recommendations for calculation of the oxigene regime at the purification of waste waters on submerged filters. Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta gidravliky. 21.123-142 (in Ukrainian).
3. Ebert H., Morgenroth E., Rittman B., Picioreanu C., van Loosdrecht M. (2006) Mathematical Modeling of Biofilms. IWA Task Group on Biofilm Modeling. 196 p.
4. **Kilich T., Babi E.B. (2023) Biofilm control strategies in the light of biofilm – forming microorganisms. World Journal of Microbiology and Biotechnology. vol. 39. PP. 1-22.**
5. Laspidou¹ C.S., Kungolos A., Samaras P. (2017) Advances in mathematical modelling of biofilm structures. Water Resources Management. IV. PP. 231 -240.
6. Levandowski Z., Beynal H. (2014). Fundamentals of biofilm research. CRC Press. 157 p.
7. Yong Ru Yang et al. (2022) Homogeneous and heterogeneous structure biofilm models for wastewater treatment. Bioscience Technology. Vol.362(16). PP.1-12.

8. Airapetian T.S., Telyma S.V., Oliynyk O.Ya. (2017) Modeling of oxygen regime in bioreactors-aerotanks at wastewaters treatment of organic pollutions. Dop. of NAS of Ukraine. No.6. P. 21-27(in Ukrainian).
9. Oliynyk O.Ya., Telyma S.V., Kalugin Yu.I., Oliynyk E.O. (2023). **Theoretical analysis of processes of combined wastewater treatment from organic pollutants (OP) and nitrogen compounds in bioreactors using biofilm models.** Dop. of NAS of Ukraine. №2. PP. 55-64 (in Ukrainian).
10. Telyma S.V. (2025). **On formation the structure of the fixed biocenosis in bioreactors at wastewaters treatment. Proceedings of the 1Y International Scientific Conference “Green Construction”, KNUBA, Kyiv. PP.204-209.**

Трикоз Л. В., д-р техн. наук, проф.;

Сташко М. В., аспірант

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна

ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ З БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ: НОВІ МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Екологічні проблеми, спричинені промисловими відходами, мають універсальний характер, і досягнення належного управління будівельними та знесеними відходами стало одним із найбільших викликів сучасного суспільства. Застосування критеріїв циркулярної економіки для розробки нових, більш стійких будівельних матеріалів стало одним з головних викликів для суспільства майбутнього. В Україні зростання кількості зруйнованих або знесених будівельних конструкцій призводить до утворення значної кількості відходів, у тому числі мінеральної вати. Цей матеріал широко використовувався для ізоляції будівель, забезпечуючи тепловий та акустичний комфорт і вогнестійкість. Незважаючи на те, що повторне використання відходів руйнування широко досліджується останніми роками, повторне використання мінеральної вати не було ретельно вивчено. Ця стаття має на меті забезпечити комплексний огляд літератури, що стосується можливостей використання переробленої мінеральної вати у виробництві будівельних матеріалів, і при цьому покращити механічні властивості матеріалів, зменшити їхню теплопровідність та підвищити довговічність, що буде сприяти сталому розвитку будівельної галузі.

Один із можливих шляхів утилізації відходів мінеральної вати, що утворюються під час реконструкції чи знесення будівель, це переробка її назад у виробництво розплаву. У дослідженні [1] порівнюється теплова реакція та поведінка плавлення звичайної мінеральної вати та відходів знесення. Було показано, вони мають принципово різні теплові реакції, де звичайна сировина зазнає виділення газу, фазового переходу та плавлення окремих сировинних матеріалів, у той час як відходи зазнають склування, кристалізації та остаточного плавлення. Відходи вати починають плавитися при нижчій температурі, ніж звичайна шихта, і потребують менше енергії для нагрівання та плавлення, ніж звичайна сировина, що робить переробку рециклінгової мінеральної вати можливою як для екологічних, так і для технологічних цілей. Цікавим способом утилізації є переробка вати з будівельних відходів і відходів

знос у активовані лугом легкі ізоляційні заповнювачі [2]. Різні пропорції подрібненої вторинної вати активуються лугом для отримання заповнювачів теплоізоляційних матеріалів. Розроблені заповнювачі мали насипну щільність у діапазоні від 720 до 850 кг/м³ і теплопровідність у сухому стані від 0,075 до 0,094 Вт/м·К, з помірною водосорбційною здатністю. Морфологія волокон рециркульованої вати впливає на реологію, утворюючи більшу кількість пор або дефектів, що призводить до зниження механічної міцності. Гідротермальне моделювання показало, що улаштування теплоізоляційного шару на ґрунті із розроблених заповнювачів зменшило вміст води та підвищило температуру поверхні підлоги. Це дослідження свідчить про потенційні переваги цього способу утилізації та підвищення комфорту мешканців.

У літературі зустрічаються дані про використання подрібненої рециклінгової вати як наповнювача для цементних або композиційних матеріалів. Як показано у [3], використання перероблених матеріалів як матриці, наповнювача або волокна, як правило, призводить до виробництва матеріалів із слабшими механічними властивостями порівняно з первинними матеріалами. При цьому необхідно враховувати можливі забруднення, щоб запобігти поширенню шкідливих речовин. Встановлено, що найбільш перспективними переробленими будівельними відходами для виготовлення композиційних матеріалів є термопласти, мінеральна вата, гіпс і деревина. Стаття [4] спрямована на вивчення теплових і структурних властивостей переробленої ізоляції з мінеральної вати, отриманої з відходів будівництва та знесення. Дослідні зразки різної об'ємної щільності (в діапазоні 50...120 кг/м³) виготовляли з подрібнених відходів облицювання 30-річної будівлі. Отримані результати порівнювали з еталонними зразками мінерально-ватного утеплювача. Зразки, виготовлені з переробленої ізоляції, мали вищі коефіцієнти теплопровідності, ніж еталонні зразки, проте вони все ще демонстрували прийнятні ізоляційні властивості, оскільки їх коефіцієнт теплопровідності знаходився в діапазоні 0,040–0,055 Вт/(м·К). Подрібнений матеріал видається перспективним для використання як засипної ізоляції, так і як наповнювач для екструдованих матеріалів.

Після завершення терміну служби мінеральна вата класифікується як небезпечні відходи, які зазвичай захороняються на сміттєзвалищах, що є складним завданням через низьку насипну щільність і нестабільність розмірів. Ця обставина підкреслює необхідність альтернативних методів переробки, які збільшують безпечність переробки відходів будівництва та знесення. У статті [5] описано можливості термохімічної переробки відходів мінеральної вати для виробництва

додаткового цементного матеріалу. Після розплавлення відходів при температурі 1400 °С методом мокрої грануляції отримували гранули, які подрібнювали до розміру 0,1 мм. Отриманий матеріал є аморфною склоподібною фазою, який характеризується гідравлічною реакційною здатністю та індексом активності, ідентичними до портландцементу. Результати цього дослідження продемонстрували, що відходи вати після термохімічної обробки придатні для використання в якості реакційноздатних компонентів в'язучого. Цей вид переробки є доволі енерговитратним, тому потрібно шукати більш економні шляхи повторного використання мінеральної вати, наприклад, подрібнення для отримання мікронаповнювача [6]. У цьому документі представлені нові можливості переробки мінераловатних плит з системи утеплення 30-річної будівлі, які були піддані мікрофрезеруванню, щоб отримати наповнювач і коротко подрібнені волокна для штукатурних розчинів. Показано, що розчини з вмістом до 1,2 мас. % таких відходів продемонстрували зниження міцності при стиску на десятки відсотків порівняно з еталонною сумішшю. З іншого боку, їхня міцність на вигин та теплопровідність покращилися, що демонструє можливі шляхи використання рециклінгової вати як теплоізоляційного матеріалу.

Завдяки високому вмісту аморфного кремнезему рециркульовані плити можуть служити сировиною для кремнеземних аерогелів, синтезованих методом сушіння при атмосферному тиску [7]. Аерогелі є дуже добрими ізоляційними матеріалами завдяки своїм унікальним властивостям, таким як низька теплопровідність і щільність, висока площа поверхні та пористість, а також притаманна їм вогнестійкість. Однак нинішня висока ціна на аерогелі перешкоджає їх використанню у великих масштабах, частково через значні виробничі витрати, такі як сировина та енергоємний процес сушіння. Для вирішення цієї проблеми досліджується в [7] економічно ефективний спосіб виробництва з використанням відходів, що дозволить зменшити кількість відходів та сприяти сталому розвитку. Кілька зразків мінеральної вати, які мають різний ступінь забруднення від відходів знесення, було перероблено в аерогелі. Отримані матеріали є гідрофобними та мають теплопровідність 22-26 мВт/(м·К), питому площу поверхні 603-676 м²/г та густину 86-136 кг/м³. Це дослідження демонструє новий підхід до вилучення кремнезему з відходів мінеральної вати, враховуючи домішки, пов'язані зі знесенням, та пропонує розуміння практик сталого управління відходами.

Сумісне використання деревини та мінеральної вати зі знесених будівель було описано в [8]. Оброблені демонтажні відходи, змішані з полімерами та добавками, були екструдовані в порожнисті тестові бруски за допомогою конічного роторного

екструдера. Результати показали, що механічні характеристики деревно-пластикових композитів на основі деревини будівельних та демонтажних відходів, а також мінеральної вати були на рівні із зазвичай використовуваними деревно-пластиковими композитами для настилів. Суміш матеріалів, що містить кілька деревних фракцій, а також мінеральну вату, також забезпечила хороші міцнісні властивості. Це означає, що деревно-пластикові композити, придатні для багатьох типів застосування, можуть бути повністю виготовлені з перероблених матеріалів.

Основні закономірності впливу вторинних волокон мінеральної вати на властивості будівельних розчинів було досліджено в роботі [9]. Розчини виготовлялися як на природному заповнювачі так і на двох типах перероблених заповнювачів – відходів бетону та кераміки. Волокна мінеральної вати були включені як часткова заміна піску у відсотках 0%, 10% та 20%. Результати показали, що, хоча традиційні розчини мають кращі технічні характеристики, розчини, виготовлені з переробленого заповнювача, мають достатню придатність для використання на будівельному майданчику. Спостерігалось погіршення таких показників, як середня густина (з 2169 до 1959 кг/м³), поверхнева твердість (з 84 до 66 за шкалою Шора), капілярна абсорбція води (з 0,51 до 0,73 кг/мм²·хв), міцність при стиску (з 25,6 МПа до 13,93 МПа). У той же час, було зроблено висновок, що включення волокон переробленої мінеральної вати до матриці розчину зменшує теплопровідність (з 1,213 до 0,719 Вт/м·К) та усадку (з 0,4 до 0,25 мм/м) під час тужавіння цих матеріалів, збільшуючи їхню механічну міцність на згин (з 5,3 МПа до 6,15 МПа) та довговічність (найменші втрати міцності та маси після 20 циклів поперемінного заморожування-відтавання) [9]. Схожі залежності були отримані в [10] при дослідженні полегшених гіпсових композитів, які включають до свого складу відходи відпрацьованих шин та перероблені волокна з теплоізоляції з мінеральної вати. Додавання гумових заповнювачів і переробленого волокна мінеральної вати зменшило щільність затверділих гіпсових композитів, що, своєю чергою, зменшило теплопровідність цих матеріалів на 30%. Тому вони представлені як альтернативне рішення для підвищення енергоефективності будівель.

Також включення цих відходів зменшує проникність водяної пари та висоту капілярного підняття води порівняно з традиційними гіпсовими композитами. Це свідчить про технічну доцільність можливого застосування цих матеріалів як збірних матеріалів у вологих приміщеннях. Хоча механічні властивості знижуються внаслідок включення гумових заповнювачів та зменшення вмісту гіпсової пасти, у всіх проаналізованих випадках перевищено мінімальні значення, що вимагаються чинними

нормами, для міцності на згин (1 МПа) та міцності на стиск (2 МПа). Крім того, спостерігається хороша адгезія перероблених волокон мінеральної вати до гіпсової матриці, що призводить до кращої поведінки при згині та зменшує ризик крихкого руйнування цих екологічно чистих будівельних матеріалів. Результати показують, що можна зменшити споживання вихідної сировини, замінивши її переробленими відходами і отримавши нові будівельні матеріали, які є легшими, з кращою водостійкістю та більшою термостійкістю. Включення перероблених волокон із мінеральної та скловати є гарним рішенням для покращення механічної стійкості полегшених гіпсових композитів, надаючи цим будівельним та демонтажним відходам друге життя шляхом повторного включення їх у процес виробництва нових збірних будинків.

Висновок

Огляд існуючих дослідження показав, що відходи мінеральної вати можуть бути ефективно перероблені та використані у виробництві нових будівельних матеріалів. Використання рециклінгової мінеральної вати у виробництві цементних розчинів, деревно-пластикових композитів, гіпсових виробів та інших матеріалів демонструє значний потенціал для зменшення екологічного навантаження та підвищення стійкості будівельної галузі. Результати досліджень свідчать про те, що додавання відходів мінеральної вати до будівельних матеріалів може покращити деякі механічні властивості, зменшити теплопровідність та підвищити довговічність. Крім того, використання перероблених матеріалів може знизити витрати на виробництво та утилізацію відходів, а також сприяти економічному розвитку регіонів.

Однак, незважаючи на значний потенціал переробки відходів мінеральної вати, існують певні виклики, такі як необхідність розробки ефективних технологій збору та сортування відходів, забезпечення їх безпечного зберігання та транспортування, а також відповідність перероблених матеріалів будівельним нормам та стандартам. Подальші дослідження та впровадження нових технологій переробки можуть сприяти більш ефективному використанню цих відходів та зменшенню їхнього негативного впливу на навколишнє середовище. Таким чином, використання відходів мінеральної вати у виробництві будівельних матеріалів є перспективним напрямком, який може сприяти зменшенню екологічного навантаження, підвищенню стійкості будівельної галузі та економічному розвитку. Важливо продовжувати дослідження у цій сфері та впроваджувати нові технології переробки для досягнення більш сталого майбутнього.

Література

1. Schultz-Falk V., Agersted K., Jensen P.A., Solvang M. Melting behaviour of raw materials and recycled stone wool waste. *Journal of Non-Crystalline Solids* 485 (2018) 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.035>
2. Koh C.H., Luo Y., Schollbach K., Gauvin F., Brouwers H.J.H. A circular approach to stone wool: Alkali-activated lightweight aggregates. *Developments in the Built Environment* 19 (2024) 100506. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100506>
3. Sormunen P., Kärki T. Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering* 24 (2019) 100742. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100742>
4. Domonkos M., Zobal O., Prošek Z., Trejbal J. Thermal properties of mineral wool insulation recovered from construction and demolition waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 34 (2022) 6-10. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.34.0006>
5. Doschek-Held K., Krammer A. C., Steindl F. R., Sattler T., Juhart J. Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* 42(9) (2024) 806-813. <https://doi.org/10.1177/0734242x241237199>
6. Trejbal J., Zobal O., Domonkos M., Prošek Z. New possibilities for recycling of mineral wool separated from thermal insulation waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 34 (2022) 122-126. <https://doi.org/10.14311/app.2022.34.0122>
7. Borzova M., Gauvin F., Schollbach K. Upcycling Waste Mineral Wool into Ambient Pressure-Dried Silica Aerogels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 13(7) (2025) 2955-2965. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c09976>
8. Jetsu P., Vilkki M., Tiihonen I. Utilization of demolition wood and mineral wool wastes in wood-plastic composites. *Detritus* 10 (2020) 19-25. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13916>
9. Ferrández D., Álvarez M., Saiz P., Zaragoza-Benzal A. Recovery of Mineral Wool Waste and Recycled Aggregates for Use in the Manufacturing Processes of Masonry Mortars. *Processes* 10 (2022) 830-849. <https://doi.org/10.3390/pr10050830>
10. Zaragoza-Benzal A., Ferrández D., Santos P., Morón C. Recovery of End-of-Life Tyres and Mineral Wool Waste: A Case Study with Gypsum Composite Materials Applying Circular Economy Criteria. *Materials* 16 (2023) 243-258. <https://doi.org/10.3390/ma16010243>

Фалєєв Ф. Р., здобувач вищої освіти

Науковий парк «Алгоритм інновацій», м. Харків, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НА ПОКРАЩЕННЯ СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Актуальність теми обумовлена глобальними екологічними викликами сучасності. Забруднення атмосферного повітря, викликане використанням викопного палива і транспортом з двигунами внутрішнього згоряння, призводить до погіршення здоров'я населення, зростання рівня парникових газів і зміни клімату. У цих умовах перехід до відновлювальних джерел енергії та електричного транспорту є найважливішим напрямком сталого розвитку, здатним забезпечити поліпшення якості повітря, зниження викидів вуглекислого газу та підвищення екологічної безпеки для майбутніх поколінь.

Огляд досліджень. Питання впливу відновлювальних джерел енергії та електричного транспорту на стан атмосферного повітря активно вивчаються в наукових і практичних роботах останніх десятиліть. Дослідники відзначають, що традиційні види палива є ключовим забруднення атмосфери і джерелом парникових газів, тоді як відновлювана енергетика сприяє значному скороченню викидів. У ряді робіт підкреслюється, що впровадження сонячної, вітрової та геотермальної енергетики дозволяє істотно знизити навантаження на навколишнє середовище і зменшити вуглецевий слід [1].

Особлива увага приділяється електричному транспорту, який розглядається як одна з найбільш перспективних альтернатив традиційним автомобілям. Наукові публікації фіксують зниження концентрації забруднювальних речовин у міських агломераціях при зростанні частки електромобілів, а також відзначають позитивний ефект для здоров'я населення. Крім того, дослідники вказують на те, що подальше розширення використання електромобілів буде посилювати екологічний ефект у міру збільшення частки відновлювальних джерел в енергетичному балансі країн [2].

Таким чином, наявні дослідження підтверджують доцільність переходу до відновлювальних джерел енергії та електричного транспорту як стратегічного

напрямку поліпшення якості атмосферного повітря та зниження антропогенного впливу на кліматичну систему.

Мета полягає в аналізі впливу відновлювальних джерел енергії та електричного транспорту на стан атмосферного повітря, виявленні їх переваг у порівнянні з традиційними технологіями та визначенні перспектив зниження антропогенного впливу на навколишнє середовище.

Завдання аналізу полягає в вивченні впливу відновлювальних джерел енергії та електричного транспорту на стан атмосферного повітря. В рамках аналізу необхідно визначити основні фактори забруднення, пов'язані з використанням традиційних енергетичних ресурсів і транспорту з двигунами внутрішнього згоряння, проаналізувати переваги електричного транспорту та відновлювальних джерел енергії в порівнянні з традиційними.

Аналіз. Стрімкий технологічний розвиток суспільства став однією з причин виникнення значної кількості екологічних проблем. Однією з найсерйозніших серед них є забруднення атмосферного повітря. Воно пов'язане з появою в атмосфері хімічних та біологічних викидів, нехарактерних для її природного складу, кількість яких значно перевищує природний рівень. Ця проблема особливо актуальна для найбільш розвинених країн світу, де стрімке зростання промисловості та технологій супроводжується значними обсягами викидів. В результаті якість атмосферного повітря швидко погіршується, що створює нові виклики для людства [3]. Тому сьогодні питання охорони та поліпшення стану повітря є одним із найбільш важливих .

Серед значних джерел забруднення атмосферного повітря є викиди, утворенні під час роботи теплових електростанцій (ТЕС), джерелами яких є спалювання вугілля, нафти чи газу. У процесі спалювання утворюється велика кількість вуглекислого газу (CO_2), оксидів азоту і сірки, а також зольних частинок, які викидаються в атмосферу та істотно погіршують її стан. Найбільші обсяги забруднювальних речовин надходять при пусках та зупинках агрегатів, а також при роботі на неповній потужності [4]. Ці аспекти роблять ТЕС однією з найбільших причин забруднення атмосферного повітря. Саме це потребує увагу спільноти для пошуку більш чистих альтернатив

Натомість, ці аспекти відсутні на різних системах відновлювальних джерел енергії. Завдяки все більшому використанню відновлювальних джерел енергії, таких як вітрова та сонячна енергія, людство отримує широкий спектр переваг, включаючи зменшення забруднення, завдяки зниженню рівня забруднення парникових газів. Наприклад, вітрова енергетика створюється за допомогою вітрових турбін, які можна

розміщувати в будь-якому місці з сильними вітрами, включаючи вершини пагорбів і відкриті водойми. Вітрова енергетика є одним з найчистіших джерел енергії, оскільки вітрові турбіни не впливають безпосередньо на викиди забруднювальних речовин в атмосферу і не потребують води для охолодження. Сонячна енергія, яка використовує сонячні або фотоелектричні елементи для перетворення сонячного світла в енергію, також є однією з найчистіших, оскільки не виробляє шкідливих речовин і не сприяє викидам парникових газів. Ще одним прикладом є геотермальна енергія, яка базується на теплі, що виробляється всередині Землі. Вода закачується глибоко під землю, нагрівається розплавленим внутрішнім ядром Землі та повертається у вигляді гарячої води або пари. Це призводить у рух турбіни, які виробляють енергію. Геотермальна енергія виробляє лише одну шосту частину вуглекислого газу, що виробляється електростанцією на природному газі, і майже не забруднює атмосферне повітря [5]. Спираючись на це, важливо зазначити, що системи відновлювальних джерел енергії в значній мірі впливають більш позитивно на стан атмосферного повітря, ніж традиційні.

Наступним значним джерелом забруднення атмосферного повітря є автомобільний транспорт. У зв'язку зі значним зростанням автопарку його внесок у забруднення повітря постійно збільшується. На частку транспорту припадає значна кількість всіх викидів в атмосферу. Особливо високі концентрації оксиду вуглецю (CO) фіксуються на перехрестях, де автомобілі тривалий час працюють на холостому ходу перед світлофорами. У районах з вузькими вулицями та високими будівлями чадний газ розсіюється повільно, що призводить до отруєнь людей, які перебувають там тривалий час, особливо поблизу перехресть. У цьому випадку основним джерелом забруднення атмосферного повітря є викиди під час роботи двигуна внутрішнього згоряння (ДВС). Велика концентрація автомобілів на ДВС призводить до значного погіршення якості повітря. При запуску, зупинці та роботі двигуна виділяється велика кількість шкідливих речовин, у тому числі вуглекислий газ (CO₂) [6]. З цього маємо, що автомобільний транспорт є одним з самих шкідливих забруднювачів атмосферного повітря, що варто більшої уваги суспільства.

Використання електромобілів дає велику перевагу, оскільки повністю електричні автомобілі майже не утворюють шкідливих речовин. Те саме стосується і підключених гібридів, які можуть працювати виключно від батареї та електродвигуна. Головною перевагою електромобілів є те, що вони сприяють більш чистому атмосферному повітрю. Під час роботи електричних двигунів не надходять шкідливі

викиди, оскільки в самому транспорті відсутні процеси спалювання палива або інших речовин. Тому кількість забруднювальних речовин, що потрапляють в повітря, залишається відносно незначною. Таким чином, поступовий перехід від двигунів внутрішнього згоряння до електричних двигунів дозволить істотно скоротити антропогенний вплив на стан атмосферного повітря [7].

Висновок

Аналіз впливу відновлювальних джерел енергії та електричного транспорту на поліпшення стану атмосферного повітря дає змогу зрозуміти, що перехід до екологічно чистих систем є невід'ємною умовою для подальшого розвитку суспільства. Традиційні джерела енергії та транспорт на двигунах внутрішнього згоряння формують значну частку шкідливих викидів, що негативно позначаються на якості повітря, здоров'я людей та кліматичних процесах в цілому. Впровадження альтернативних джерел енергії дозволяє не тільки скоротити обсяги викидів вуглекислого газу та інших забруднювачів, але й поступово зменшити залежність від викопного палива. Електротранспорт у свою чергу, демонструє відчутні переваги перед традиційним автомобільним транспортом. Відсутність вихлопних газів і нижчий вуглецевий слід протягом усього циклу сприяють зниженню антропогенного впливу на атмосферу і поліпшенню якості повітря в містах.

Таким чином, поступова відмова від традиційних видів палива і перехід на використання відновлювальних джерел енергії в поєднанні з поширенням електротранспорту створюють реальні передумови для значного поліпшення стану атмосферного повітря, підвищення рівня екологічної безпеки та забезпечення сприятливих умов для життя і здоров'я нинішніх та майбутніх поколінь

Література

1. Gary Fuller. How cutting US air pollution could save 6000 lives a year by 2030. 2025. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.theguardian.com/environment/2025/sep/05/air-pollution-deaths-us-fossil-fuels>
2. Zara Abrams. Study links adoption of electric vehicles with less air pollution and improved health. 2023. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://keck.usc.edu/news/study-links-adoption-of-electric-vehicles-with-less-air-pollution-and-improved-health/>
3. Нерубацький В.П., Фалєєв Ф.Р., Шаповалова Д.С. Аналіз впливу автомобільного та залізничного транспорту на стан атмосферного повітря // Матеріали X Міжнародного

- молодіжного конгресу «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». Львів, 2025. С. 39.
4. Романенко О.С., Аверченко В.І. Теплові електростанції та їх вплив на довкілля // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів. Харків, 2017. С. 55-56.
5. Sienna Bishop. Steps toward cleaner air: A closer look at the aier quality and climate benefits pf renewable energy, 2023. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.clarity.io/blog/steps-toward-cleaner-air-a-closer-look-at-the-air-quality-and-climate-benefits-of-renewable-energy>
6. Татарченко Г.О., Кравченко І.В., Писаренко М.В., Поркуян С.Л. Дослідження забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами автотранспорту в міському середовищі // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля №8. Київ, 2019. С. 99-103.
7. Joshua Linn, daniel Shawhan. What Are the Benefits of Electric Vehicles for Climate, Air Pollution, and Health? 2023. [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.resources.org/common-resources/what-are-the-benefits-of-electric-vehicles-for-climate-air-pollution-and-health/?gad_source=1&gad_campaignid=20303386546&gbraid=0AAAAADGZZQPyUQPXKiDrWI5LNDbU-h3Uf&gclid=CjwKCAjw_fnFBhB0EiwAH_MfZi7v2kKZvR2U5YqZP-_I

Хабарова Г. В., канд. техн. наук, ст. дослідник

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

Коваленко Г. Д., д-р фіз.-мат. наук, проф.

Інститут фізики високих енергій і ядерної фізики, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України», м. Харків, Україна

Барбашев С. В., д-р техн. наук, проф.

Національний університет «Одеська політехніка» м. Одеса, Україна

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ В УМОВАХ ВІЙНИ У ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Згідно звіту World Meteorological Organization (WMO) про якість повітря та клімат за вересень 2025 року [1] відслідковується складна взаємодія між якістю повітря та кліматом та наголошується, що обидві проблеми необхідно розглядати разом для захисту здоров'я людини, екосистем та економіки. У звіті висвітлено роль аерозолів, особливо твердих частинок PM_{2,5} як наслідок забруднення атмосферного повітря у містах, при виникненні лісових пожеж з акцентом на вибір засобів спостереження стану атмосферного повітря.

Звіт WMO [1] та наші дослідження для України [2] основне значення приділяють супутниковим технологіям, які дають найважливіші відомості у доповнення до наземних мереж моніторингу, які необхідні для калібрування та перевірки.

За загальною динамікою в Україні у 2024 році площа пожеж перевищила 965 000 га, що більше ніж удвічі вищий показник, ніж в інших країнах Європи того року [3].

За 2023 рік в Україні трапилось понад 2 185 лісових пожеж, які охопили близько 226 400 га найвищий показник за весь період спостережень. Супутникові та дослідницькі дані вказують, що в 2022–2024 рр. попри зниження кількості окремих вогнищ (близько 3 000 осередків у 2024 р.), площа горіння залишається надвисокою та складала майже 0,8 млн. га.

Проведені дослідження щодо кількості лісових пожеж залишаються надзвичайно актуальними у всіх країнах світу, особливо в контексті зміни клімату. Щорічно у США реєструється близько 130 тисяч лісових пожеж, а загальна площа вигорання становить до 3 млн. гектарів. У Португалії та Іспанії зареєстровано від 156 та 210 тисяч пожеж відповідно. В Україні у довоєнний період було зареєстровано

понад 30 000 лісових пожеж, серед яких вогнем було пошкоджено 34 тисячі гектарів лісу [4]. Отже, актуалізація проблеми лісових пожеж у світі, причиною яких, майже у всіх випадках є антропогенний вплив, та їх наслідків, потребує значної уваги серед науковців.

Особливості проведення моніторингу стаціонарними засобами в умовах війни визначаються значним зростанням кількості пожеж у лісових, сільських, природоохоронних територіях через артилерійські обстріли; вибухи боєприпасів; мінування територій; обмежений доступ до територій для рятувальників ДСНС України.

Дослідження глобальної системи Global Wildfire Information System (GWIS) [5] показують, що Харківський регіон є одним із лідерів за загальною площею горіння та складає близько 4 % від загального об'єму лісових пожеж в Україні [6] та одним із найуразливіших через близькість до зони бойових дій. Найбільш постраждалими районами є: Дергачівський, Чугуївський, Богодухівський та Куп'янський райони.

За даними дослідження за 2024 рік в Україні [7] лісові пожежі внаслідок збройної агресії РФ проти України сприяли збільшенню загального обсягу викидів парникових газів майже до 230 млн. т за три роки війни. Ці викиди оцінюються у 55 млн т за рік війни. Дослідження [7] за 2024 рік показало також, що в Україні згоріло 92 100 гектарів, що більш ніж удвічі перевищує середньорічний показник (38 300 гектарів, знищених за два попередні роки), що загалом призвело до викидів майже 49 млн. т CO₂-еквівалента за три роки та 16,9 млн. т CO₂-еквівалента за 2024 рік.

Оцінювання наслідків лісових пожеж та масштабів руйнувань екосистем із навантаженням на стан атмосферного повітря з використанням новітніх технологій та науково обґрунтованих підходів в умовах воєнного стану в Україні є актуальністю проведення даного дослідження.

Метою роботи є аналіз даних дистанційного моніторингу стану атмосферного повітря, який утворився внаслідок пожеж, з урахуванням існуючих в Європі платформ та засобів.

Виклики щодо проведення дистанційного моніторингу атмосферного повітря в Україні в умовах війни: мінування територій, що унеможлиблює наземний контроль; ризик для екіпажів ДСНС України та БПЛА через артобстріли; недоступність частини супутникових даних високої роздільності, а також висока вартість користування міжнародними платформами.

Важливо відмітити, що високий рівень задимленості атмосферного повітря викликає ризики для здоров'я цивільного населення.

Засоби дистанційного моніторингу, які у світі використовуються для ідентифікації осередків лісових пожеж, представлено нижче із їх характеристикою.

Супутниковий моніторинг представлено даними отриманими із міжнародних платформ та систем:

- Copernicus (Sentinel-2, Sentinel-3) [8];
- NASA FIRMS (MODIS, VIIRS) — виявлення активних термальних аномалій у режимі майже реального часу [9];
- Система EFFIS (ЄС) — прогнозування та спостереження за пожежами [10].

БПЛА та безпілотні системи. В Україні вже є досвід застосування автономної безпілотної авіаційної системи «Menatir», яка може здійснювати цілодобовий моніторинг великої території та картографування за допомогою безпілотників. Основними функціями БПЛА та безпілотних систем є: виявлення точок займання; тепловізійний контроль та передача даних у реальному часі та використання військових та цивільних дронів для моніторингу пожеж у районах обмеженого доступу. Однак, попри переваги, використання БПЛА та безпілотних систем для оперативного контролю навколишнього середовища та виявлення наслідків лісових пожеж у воєнний період в Україні є обмеженим та потребує дозволу військових адміністрацій.

Громадські мережі та відкриті платформи, які використовують дані супутників з міжнародних платформ (NASA) [9], та представлені в Україні:

- EcoCity, SaveEcoBot [11] — інтеграція даних про задимленість та якість повітря;
- OpenAQ [12] — дані з супутників та наземних станцій, які показують напрямок вітру, осередок пожеж, пошкоджену площу у гектарах та стан якості атмосферного повітря.

Основні інструменти дистанційного моніторингу та сфера їх застосування наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 — Основні платформи та системи дистанційного моніторингу

Інструмент	Застосування	Досвід використання в Україні
NASA FIRMS	Виявлення пожеж, теплові аномалії	Під час обстрілів у Харківській, Донецькій та Луганській областях

Sentinel Hub EO Browser	Аналіз знімків Sentinel-2	Оцінка масштабу лісових пожеж
Google Earth Engine	Обробка супутникових даних	Масштабні оцінки збитків
MENATIR	Аеророзвідка пожеж за допомогою дронів	Над Харківською обл. у 2022–2024 рр.
EFFIS (ЄС)	Оцінка ризиків пожеж, моделювання	Доступна для України з 2022 р.

EFFIS – Європейська система інформації про лісові пожежі, яка підтримує служби, відповідальні за захист лісів від пожеж у ЄС та сусідніх країнах, а також надає службам Європейської Комісії та Європейському парламенту актуальну та достовірну інформацію про лісові пожежі в Європі. З 2015 року EFFIS стала одним із компонентів Служб управління надзвичайними ситуаціями в програмі ЄС Copernicus [8]. Дані щорічного звіту [8], який містить комплексний аналіз сезону лісових пожеж 2024 року на основі даних EFFIS та доповнюють дані в режимі реального часу, надані у веб-додатках EFFIS. Вони співвідносять їх із впливом лісових пожеж та представлені у вигляді згорілих площ, які відображені на карті EFFIS.

Глобальна інформаційна система про лісові пожежі (GWIS) [5] – це спільна ініціатива робочих програм GEO та Copernicus та містить об'єднані існуючі джерела інформації на регіональному та національному рівнях, щоб забезпечити комплексне уявлення та оцінку пожеж із їх наслідками на глобальному рівні; пожежі, що відображаються на карті GWIS, можуть включати пожежі, навмисно підпалені з метою управління рослинністю. Крім того, GWIS надає інструменти для підтримки оперативного управління лісовими пожежами від національного до глобального масштабу.

GWIS базується на поточній діяльності EFFIS [6], Групи з впровадження пожеж Глобальної наземної системи спостереження (GTOS), Глобального спостереження за лісовим покривом – Глобального спостереження за динамікою землі (GOFC-GOLD), (GOFC Fire IT) та пов'язаних з ними регіональних мереж, доповнюючи існуючу діяльність, що проводиться по всьому світу щодо збору інформації про лісові пожежі.

GWIS складається з п'яти програм:

- Current Situation Viewer;
- Current Statistics Portal;
- Country Profile;
- Long-term fire weather forecast;

- Data&Services.

Для проведення дистанційного моніторингу лісових пожеж розглянемо програми: Current Situation Viewer (Переглядач поточної ситуації) та Long-term fire weather forecast (Довгостроковий прогноз пожежної погоди), яка відображає щомісячний та сезонний прогноз аномальних температур та опадів, які очікуються у регіонах Європи та Середземномор'я.

Програма Current Situation Viewer надає інформацію майже в режимі реального часу щодо:

- 1) прогнозів пожежної небезпеки до 10 днів наперед на основі Канадського індексу пожежної погоди (FWI);
- 2) випадків блискавок;
- 3) активні виявлення пожеж від датчиків NASA MODIS та VIIRS;
- 4) периметру площі вигорання майже в режимі реального часу, отримані від MODIS та VIIRS;
- 5) викидів пожеж від служби Copernicus CAMS.

На рисунку 1 червоним та фіолетовим кольором показано осередки пожеж, а жовтим та зеленим - розповсюдження викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря за даними супутникових спостережень у режимі реального часу.

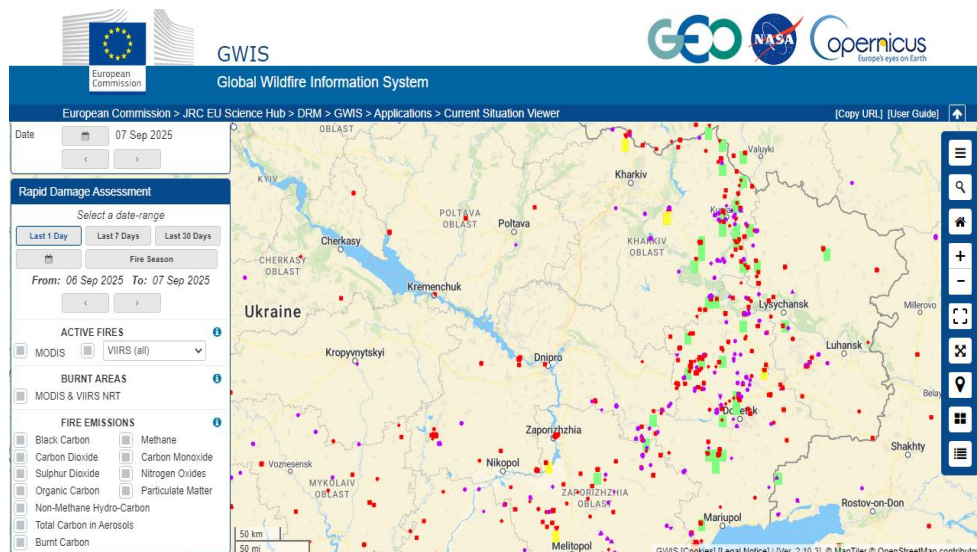


Рисунок 1 - Візуалізація карти із осередками пожеж та викидами в атмосферне повітря

На платформі NASA FIRMS [5] доступні дані про активні пожежі за допомогою спектрорадіометру з візуалізацією середнього дозволу (MODIS), набору радіометрів з візуалізацією у видимому інфрачервоному діапазоні (VIIRS) та Landsat, програми

супутникового спостереження за Землею, яка керується NASA та Геологічною службою США USGS за останні 24, 48 годин та 7 днів.

Дослідження дистанційного моніторингу за допомогою міжнародних платформ, даних, представлених у міжнародних звітах [13] та повідомленнях ДСНС України представлено у таблиці 2 із площами лісових пожеж у Харківській області за 2022–2025 рр.

Аналіз даних, отриманих за результатами дослідження показали, що найвищий пік спостерігався у 2022 році (181 400 га). Основний вплив був спричинений в результаті обстрілів і мінування. У серпні 2024 року спостерігався другий за масштабом пік (25 500 га), пов’язаний із загостренням бойових дій. У травні 2024 року — середній рівень активності (3 700 га).

Таблиця 2 — Площі лісових пожеж у Харківській області за період 2022–2025 рр.

Рік / Період	Площа пожеж (га)	Примітка
2022	181 400	Масштабні втрати через обстріли, мінування. Найбільші пожежі в Ізюмському та Вовчанському районах.
Травень 2024	3 700	14 активних вогнищ, найбільші — Ізюм, Старий Салтів. Частково локалізовано — 2 300 га.
Червень 2024	280	Сезонні природні пожежі та локальні займання після вибухів.
Серпень 2024	25 500	37 масштабних пожеж, більшість у Вовчанському та Куп’янському районах.
Вересень 2024	467,7	115 зафіксованих пожеж.
Травень 2025	85	8 пожеж, найбільша — у районі Ізюму.

Спади у червні 2024 (280 га) та травні 2025 (85 га) показують локалізовані інциденти або сезонні природні пожежі. Дані дослідження, наведені у таблиці 2, показують різке зростання площі лісових пожеж під час бойових дій у 2022 році та серпні 2024 років. У міжсезоння спостерігаються коливання залежно від інтенсивності обстрілів та мінування територій. Попри зменшення активності у 2025 році, ризики залишаються надзвичайно високими в умовах збройної агресії рф проти України.

SaveEcoBot [7] також показує карту якості повітря з напрямком та швидкістю вітру та аналіз і карту пожеж в Україні з деталізацією для кожної області. SaveEcoBot автоматично збирає дані з системи FIRMS NASA щогодини, аналізує пожежі в Україні, підраховує їх кількість та відображає на карті пожеж. Карта показує динаміку пожеж на

території України та окремо в кожній області за останні 3 роки в режимі реального часу за останні 24 години. Відмітимо, що кількість пожеж в Харківській області восени 2024 року площею понад 1 гектар зросла у 36 разів порівняно з роком початку війни і залишається значним джерелом викидів парникових газів.

Спостереження за кількістю осередків пожеж в Харківській області за останні 24 години станом на 5 вересня 2025 р. – 25, а станом на 9 вересня — 33. Загальна кількість осередків пожеж в Україні станом на 5 вересня 2025 р. — 565.

В Україні в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення необхідно проводити оцінювання, уніфікацію та інтеграцію даних моніторингу пожеж з використанням дистанційного зондування, що дозволить прогнозувати зміни концентрацій в атмосферному повітрі забруднюючих речовин та їх вплив на зміну клімату в рамках Плану відновлення України, особливо на територіях, на які неможливо потрапити або вони є небезпечними для відбору проб атмосферного повітря мобільними та наземними станціями моніторингу.

Пропонуємо:

- розширити використання супутникового моніторингу стану атмосферного повітря взагалі, у т.ч. моніторингу пожеж, з використанням платформ NASA, Copernicus та FIRMS та створити локальні центри обробки та аналізу супутникових даних на базі ДСНС України і громадських платформ;

- відповідним структурам розробити механізм щодо забезпечення БПЛА екологічних служб і громад;

- розробити законодавчі механізми використання військових і цивільних БПЛА, в тому числі для моніторингу лісових пожеж, з метою попередження наслідків збройної агресії РФ проти України для довкілля та здоров'я людини.

Література

1. WMO Air Quality and Climate Bulletin No. 5 – September 2025. URL: https://library.wmo.int/viewer/69625/download?file=Air-Quality-and-Climate-Bulletin_5_en.pdf&type=pdf&navigator=1.
2. Khabarova H.V., Kovalenko G.D., Barbashev S.V. Application of satellite technologies for monitoring the radiation state of the atmospheric air during the war and post-war reconstruction of Ukraine. Problems of Atomic Science and Technology. 2025. № 3(157). P. 194–199. DOI: <https://doi.org/10.46813/2025-157-194>.

3. Ukraine hit by record-breaking wildfires in 2024. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC141505>.
4. Yevhen Melnyk, Vladimir Voron. Tendencies of Fire Development in the Forests of Ukraine. Environ. Sci. Proc. 2021, 3(1), 106. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-08064>.
5. Global Wildfire Information System. (GWIS). URL: <https://gwis.jrc.ec.europa.eu/applications>.
6. Anatolii Vorobiev. Analysis of Forest Fire Statistics and Their Impact on Ukraine's Climate Based on Satellite Imagery Data Processing in the Global Information System GWIS / Techniques for Earth observation data acquisition, processing and interpretation. Vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.1.279>.
7. Forest fires push up greenhouse gas emissions from war in Ukraine. URL: <https://www.theguardian.com/world/2025/feb/24/forest-fires-push-up-greenhouse-gas-emissions-from-war-in-ukraine>.
8. Copernicus Data Space Ecosystem. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/>.
9. FIRMS. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>
10. European Forest Fire Information System (EFFIS). URL: <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/>
11. Saveecobot. URL: <https://www.saveecobot.com/analytics/fires/kharkivska-oblast?days=1095>
12. IQAir. URL: <https://www.iqair.com/air-quality-map>.
13. Devastating forest loss in Ukraine highlights war's environmental toll. URL: https://phys.org/news/2025-03-devastating-forest-loss-ukraine-highlights.html?utm_source=chatgpt.com.

Olha Khliestova

Department of Primary Science Institute of Modern Technologies, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine

Michal Petrů

Department of Machine Parts and Mechanism, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic,

Katarzyna Los

Polytechnic Faculty, University of Kalisz, Plac Wojciecha Bogusławskiego 2, 62-800 Kalisz, Poland.

STUDY OF THERMAL CONDUCTIVITY OF A WASTE TEXTILE MATERIAL WITH AIR CONTAMINATION

When assessing the fire resistance limit of building structures and materials, thermal conductivity analysis plays an important role. Thermal insulation materials with air-filled cavities, as a rule, have the lowest thermal conductivity. The presence of air cavities reduces the weight of such materials and reduces thermal conductivity due to the fact that the thermal conductivity of air is very low, and convective heat exchange in the cavities is impossible. The relationship between the fire resistance of a material and thermal conductivity significantly depends on the properties and structure of a particular material.

Materials with low thermal conductivity are able to withstand high temperatures without significant heating and destruction. Low thermal conductivity slows down the spread of heat in the material, which helps to maintain its structural integrity, prevents its heating and ignition, and prevents the spread of fire. Waste textile materials can combine high fire resistance and low thermal conductivity due to their multilayer structure and air pockets. This combination slows down the spread of heat, as air is a poor heat conductor, and helps maintain the structural integrity of the material, preventing its rapid heating and ignition. These materials can combine high fire resistance and low thermal conductivity by creating a multilayer structure, similar to sandwich panels [1,2].

In such structures, with the right choice of material, design and installation, a specially folded fabric, waste textile material, with air gaps can be used to increase the fire resistance of the structures. The air pockets created between the layers of the waste textile material act as a thermal insulator. Air is a poor conductor of heat, so it slows down the spread of fire and heat through the structure, and the fabric itself, especially if it is made of fire-resistant materials, can delay or even prevent the structure from catching fire. The following requirements are imposed on the fabric. First, the fabric must be tightly folded to provide

maximum thermal insulation, and secondly, it must be multi-layered - the more layers of fabric with air gaps, the higher the fire resistance of the structure. (Fig. 1) [1]

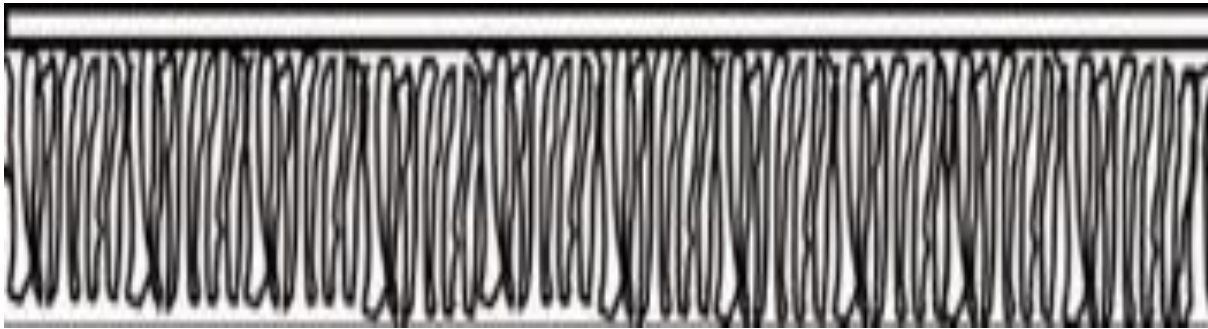


Figure 1 – Configurations of the layer of thermal insulation fabric material (waste textile material) used to increase the fire resistance of sandwich panels

In this regard, it is necessary to calculate the optimal ratio of fabric layers and air gaps to create the most effective thermal insulation and fire resistance.

Calculating the thermal conductivity of a multilayer heat-insulating wall during a fire is a complex task that requires taking into account many factors [3]. During a fire, the ambient temperature and, consequently, the temperature of the material constantly change over time. Under conditions of non-stationary heat exchange, the temperature at different points of the material will also change over time. Unlike calculating thermal conductivity under normal conditions, during a fire it is necessary to take into account the non-stationary nature of heat exchange, the change in temperature over time, and the possible change in the properties of materials at high temperatures. Let us consider some factors that determine the features of calculating a multilayer wall for heat-insulating, fire-resistant structures:

1. Under the influence of high temperatures, the thermal insulation properties of materials may decrease, which must be taken into account in the calculations.

2. Since during a fire the temperature is constantly increasing, the heat flow and temperature at different points of the wall change over time.
3. Since heat exchange is non-stationary, for calculation, use methods that take into account the non-stationary nature of heat exchange, for example, the finite element method. This is the most accurate method, allowing for complex geometric shapes and changes in material properties at high temperatures, which, however, requires the use of specialized software.

Simplified methods can be used for an approximate assessment of thermal conductivity, which, unfortunately, do not take into account all the factors affecting heat exchange during a fire.

The most accurate of the simplified calculation methods for cases where the layers of material have different values of thermal conductivity and thickness is the thermal resistance method

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1)$$

where: R_{Σ} - total thermal resistance of a multilayer wall; $R_1, R_2, \dots, R_n$ - thermal resistance of each layer

Thermal resistance of each layer is calculated using the formula:

$$R = d / \lambda \quad (2)$$

where: d - layer thickness; λ - thermal conductivity of the layer

After calculating the total thermal resistance, the total thermal conductivity of the wall can be calculated using the formula:

$$\lambda_{\Sigma} = d_{\Sigma} / R_{\Sigma} \quad (3)$$

where d_{Σ} - total wall

If the material is folded in such a way that air-filled voids are formed between its layers, it is of interest to determine the thermal conductivity of such a layer and the effect of its packing density on the overall thermal conductivity of the layer [4]. If the design of the thermal insulation layer consists of three layers of material and two air layers (Fig. 2)

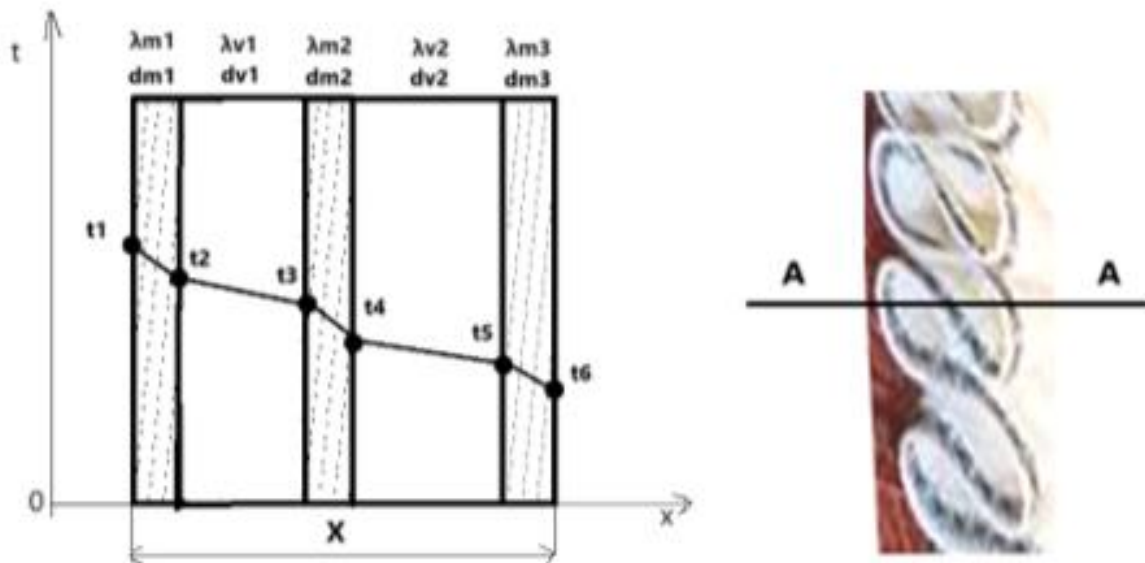


Figure 2 – Thermal conductivity through a layer with an air gap (section AA of the layer)

If we assume that $\lambda_{m1} = \lambda_{m2} = \lambda_{m3} = \lambda_m$ and $dm1 = dm2 = dm3 = dm$
and $\lambda_{v1} = \lambda_{v2} = \lambda_v$

The total thermal resistance of such a layer will consist of the sum of the thermal resistances of thermal conductivity

$$R_{\Sigma} = d_m / \lambda_m + d_{v1} / \lambda_v + d_m / \lambda_m + d_{v2} / \lambda_v + d_m / \lambda_m = 3 * d_m / \lambda_m + d_{v1} / \lambda_v + d_{v2} / \lambda_v \quad (4)$$

Otherwise, we can write the thermal resistance of a layer consisting of i - layers of material and j - air layers, assuming that the air layers are the same thickness

It will be equal to

$$R_{\Sigma} = \sum d_{mi} / \lambda_m + \sum d_{vj} / \lambda_v, \quad (5)$$

from which it is possible to determine the required layer thickness $(\sum d_{mi} + \sum d_{vj})$ or interlayers d_{mi} and d_{vj} , given by known values

If the total layer thickness is X , then given the number of layers of material i , it is possible to calculate the thickness of the air interlayers $\sum d_v$

Knowing the heat flux by radiation to the surface ($q_{\text{žáření}}$), described by the Stefan-Boltzmann equation (Fig. 3), equating it with the specific heat conduction flux ($q_{\text{tepelná vodivost}}$), we can determine the required thickness of the air layer at a given temperature t_1

$$\sigma * ((T_s)^4 - (t_1 + 273)^4) = (t_1 - t_6) / R_{\Sigma}, \text{ kde } R_{\Sigma} = [\sigma * ((T_s)^4 - (t_1 + 273)^4)] / (t_1 - t_6) \quad (6)$$

and from equation 4 we find the thickness of the interlayer

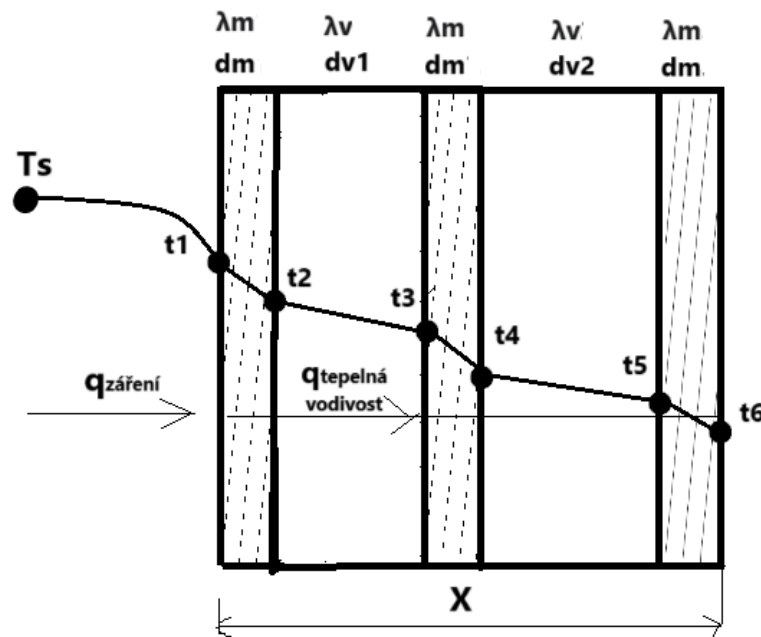


Figure 3 – Heat flows in a layer with an air gap

These studies confirm that a clear understanding of the thermal behavior of textile waste and the factors affecting it allows not only for an effective evaluation of the materials but also for the development of accurate models to predict their properties, particularly the

influence of air inclusions on thermal conductivity. It is these features that make such materials effective for fire protection and thermal insulation.

Conclusion

1. The determination of the thermal conductivity coefficient can solve two problems: structural analysis for figuring out the layer thickness and thermal analysis of the temperature field in the layer for a given thickness and layer configuration.

2. Calculation of thermal conductivity is necessary for designing effective fire protection structures, such as fire curtains, doors, and partitions.

3. The analysis of thermal conductivity allows you to compare different configurations of the material and air gap by their fire protection properties and select the most suitable for specific operating conditions.

4. The prediction of thermal conductivity taking into account non-stationarity allows you to foresee how quickly the material will heat up during a fire and how long it will be able to perform its fire protection functions.

References

- 1 X. Xiong, M. Venkataraman, D. Liederhausová, T. Yang, R. Mishra, J. Militký, M. Petru, An experimental evaluation of convective heat transfer in multi-layered fibrous materials composed by different middle layer structures, *Journal of Industrial Textiles*, SAGE PUBLICATIONS INC, 1, p. 362-379, 18 pages, ISSN: 1528-0837, n. 3, [Online], 2021
2. Luo Z, Li W, Li S, et al. Lattice Boltzmann Modeling of the Effective Thermal Conductivity for Complex Structured Multiphase Building Materials. *Applied Mechanics and Materials* 2014; 541: 694–698.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072906002122>
- 3 Farnworth B. Mechanisms of heat flow through clothing insulation. *Textile Res J* 1983; 53: 717–725.
<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1528083719878845#core-bibr1-1528083719878845-1>
- 4 Majumdar, A. (2010). Thermal behaviour of textiles: A review. *Journal of the Textile Institute*, 101(2), 163-182. <https://www.researchgate.net/publication/288786487>

Христич О. В., канд. техн. наук, доц.;

Корогодська А. М., д-р техн. наук, ст дослідник

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м.

Харків, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАТАЛІЗАТОРІВ У СИРОВИННИХ СУМІШАХ СПЕЦІАЛЬНИХ ЦЕМЕНТІВ

Огляд сучасної наукової літератури свідчить про можливість застосування ресурсозберігаючих технологій для отримання глиноземистих цементів і бетонів, зокрема залученням відходів каталізаторів як альтернативної сировини, що сприяє комплексному вирішенню актуальних екологічних завдань. Для хімічної та нафтопереробної промисловості характерне широке використання глиноземистих каталізаторів, що містять значні кількості активного Al_2O_3 . Промислові каталізатори для метанування, наприклад, зазвичай містять метали-активатори, такі як нікель, кобальт, залізо, рутеній, родій або платина, які наносяться на високодисперсний носій, наприклад, оксид алюмінію (Al_2O_3), діоксид кремнію (SiO_2) або діоксид цирконію (ZrO_2), для збільшення поверхні контакту та забезпечення стабільності каталізатора. А для очищення природного газу від сполук сірки - процеси гідрування сіркоорганічних домішок здійснюється при додаванні в природний газ водню або азото-водневої суміші в кількості 3-10 % від витрат и природного газу. Найбільш ефективними є кобальт-молібденові (50 % CoO , 15 % MoO_3) і нікель-молібденові (10 % NiO , 10 % MoO_3) каталізатори, нанесені на оксид алюмінію [1]. Перспективним є також використання відпрацьованих каталізаторів синтезу аміаку, які містять NiO на носії з Al_2O_3 . Дослідження показали, що при застосуванні електрошлакової плавки з вуглецевим відновником досягається рівномірний нагрів, що сприяє відновленню NiO та розділенню металевої та оксидної фаз. Отриманий оксидний продукт відповідає вимогам, які висуваються до сучасних глиноземистих цементів [2]. На вітчизняних заводах каталітичну конверсію метану проводять на нікелевих каталізаторах типу ГІАП-3, також застосовуються вдосконалені наносні нікелеві каталізатори, наприклад ГІАП-3-6Н, ГІАП-16 і ін [1]. Якщо розглядати іноземні аналоги, то це, наприклад, Katalco 57-4 виробництва Johnson Matthey (Велика Британія) — це нікель-на- $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (NiO 15–18 %)

каталізатор, який використовують у реакції гідрогенізації CO_2 (реакція Сабатьє) [3], або Ni–Co біметалеві нанокаталізатори на основі мезопорного кремнезему (Silica), які використовуються у гідрогенізації як ефективні промислові каталізатори («Mesoporous Silica-Supported NiCo Bimetallic Nanocatalysts») [4].

Найпотужніші підприємства України, яке виготовляє різноманітну хімічну продукцію - Черкаський «Азот», «РІВНЕАЗОТ», державний Одеський припортовий завод, приватний «ДніпроАзот» використовують промислові каталізатори, які містять оксиди або сульфід цінних кольорових металів в поєднанні: Ni – Mo, Co – Mo, Ni – W і основу – оксид алюмінію. При цьому на багатьох стадіях виробництва використовуються різні види каталізаторів, нанесені, найчастіше, на керамічну підкладку. Таким чином, накопичується велика кількість відпрацьованих промислових каталізаторів, як в Україні так і за кордоном, які після завершення терміну експлуатації втрачають свої функціональні характеристики та залишаються обмеженими щодо подальшого практичного застосування. Ці великотоннажні відходи можуть бути перспективною сировиною для виробництва в'язучих матеріалів спеціального призначення.

Комплексні фізико-хімічні дослідження авторів [5, 6] підтверджують, що такі відходи можна застосовувати як компоненти для синтезу глиноземистого цементу та композиційних матеріалів, які поєднують гідралічноактивні алюмінати кальцію з тугоплавкими шпінелями кобальту та нікелю. Особливу наукову цінність в цьому напрямку становлять дослідження в системі $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CoO-NiO}$, яка відзначаються стабільною фазовою організацією та підвищеними характеристиками отриманих матеріалів. Це дозволяє отримувати якісні матеріали за ресурсозберігаючої технологією з високими експлуатаційними характеристиками, які можуть використовуватись у виробництві вогнетривких виробів спеціального призначення для різних галузей промисловості, сприяти масштабній утилізації відходів та значному покращенню екологічних обставин в країні.

Література

1. Технологія зв'язаного азоту: курс лекцій. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», ОПП «Хімічні технології неорганічних речовин та водоочищення» / А.Л. Концевой, С.А. Концевой ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 8,28 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 293 с.

2. Zhang, J., Wang, H., Li, N. High-Performance Calcium Aluminate Cement with Spinel for Refractory Applications // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47. – P. 17485–17494.
3. Tymoshenko O., Hryhoriev V., Horbonos T., et al. Kinetic Modeling of Carbon Dioxide Methanation over Katalco 57-4 Catalyst // *East European Journal of Advanced Technology and Resource Saving*. – 2023. – № 2(3). – C. 19–27. – DOI: 10.32782/etars.2023.2.3.405.
4. Renda S., Liguori S., Calemme V., et al. Nickel-based catalysts for CO₂ methanation: Structure–activity relationships // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2022. – Vol. 306. – P. 121023. – DOI: 10.1016/j.apcatb.2021.121023
5. Khrystych, O. V., Shabanova, G. N., Korohodska, A. N., Logvinkov, S. M., Mykhailova, E. A. Physico-chemical basics of creating alumina cements based on nickel and cobalt spinel // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2024. – №5. – pp. 262–271. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-156-5-85-90>
6. Khrystych, O. V., Korohodska, A. N., Shabanova, G. N., Mykhailova, E. A., Optimization of spinel-containing alumina cements based on the CaO – Al₂O₃ – CoO – NiO system composition // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2025. – №4. – pp. 13-22. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-161-4-13-22>

Черкашина М. К., канд. юрид. наук, доц.;

Соколова А. К., д-р юрид. наук, доц.

*кафедра екологічного права Національного юридичного університету
імені Ярослава Мудрого, м. Харків, Україна*

ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ВОДООЧИСТКИ ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД В УКРАЇНІ

Багато підприємств у процесі своєї діяльності використовують воду, яку потім скидають у якості виробничих стічних вод (наприклад, до таких належать підприємства металургійної, хімічної, текстильної, харчової галузей). Відповідно стічні води містять низку небезпечних і забруднюючих речовин та негативно впливають на навколишнє природне середовище.

Серед 17 Цілей Сталого Розвитку, які було затверджено резолюцією Генеральної Асамблеї Організації Об'єднаних Націй від 25 вересня 2015 року № 70/1 «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» в розрізі окресленої проблематики привертає увагу ціль 6: доступність і стале управління водними ресурсами і забезпечення санітарії для всіх [11]. І визначено наступні завдання:

- підвищити якість води за допомогою зменшення забруднення, ліквідації скидання відходів і зведення до мінімуму викидів небезпечних хімічних речовин та матеріалів, скорочення вдвічі частки неочищених стічних вод і значного збільшення масштабів рециркуляції та безпечного повторного використання стічних вод у всьому світі;

- розширити міжнародне співробітництво і підтримку в справі зміцнення потенціалу країн, що розвиваються, щодо здійснення діяльності та програм у галузі водопостачання й санітарії, включаючи збір поверхневого стоку, опріснення води, підвищення ефективності водокористування, очистку стічних вод і застосування технологій рециркуляції та повторного використання.

Також в п. 6 Указу Президента України від 30 вересня 2019 р. № 722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» передбачено забезпечення доступності та сталого управління водними ресурсами та санітарією, що повністю відповідає ЦСР ООН [8]. Водночас варто звернути увагу на регулювання цього

питання у законодавстві Європейського Союзу, з огляду на підписання 27 червня 2014 р. Угоди про Асоціацію між Україною та ЄС [9], а також набуттям Україною статусу кандидата на вступ до Європейського Союзу. Одним з таких документів є Директива Ради 91/271/ЄЕС «Про очистку міських стічних вод» від 21 травня 1991 року [10].

Повертаючись до національного законодавства, зазначимо, що Водний Кодекс України у ст. 1 надає визначення поняття «стічні води»: вода стічна – вода, що утворилася в процесі господарсько-побутової і виробничої діяльності (крім шахтної, кар'єрної і дренажної води), а також відведена з забудованої території, на якій вона утворилася внаслідок випадання атмосферних опадів. А ст. 70 Водного Кодексу України передбачає, що скидання стічних вод у водні об'єкти допускається виключно за умови наявності нормативів гранично допустимих концентрацій та встановлених нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин [1].

Спеціальним нормативно-правовим актом, який визначає правові, економічні та організаційні засади функціонування системи водовідведення є Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод» від 12 січня 2023 р. № 2887-IX [3], він є євроінтеграційним, і по суті імплементує норми, що містяться в Директиві Ради 91/271/ЄЕС. Суб'єктами відносин у сфері водовідведення виступають органи державної влади, органи влади АРК, органи місцевого самоврядування, суб'єкти господарювання, що здійснюють водовідведення, споживачі. Господарська діяльність у сфері водовідведення відповідно до ст. 14 Закону України «Про водовідведення та очищення стічних вод» поділяється на такі види: централізоване водовідведення, нецентралізоване водовідведення, транспортування стічних вод та осадів стічних вод спеціальним транспортом.

В основу диференціації закладено такий критерій як популяційний еквівалент. Тобто числовий показник навантаження стічної води органічними речовинами, що підлягають біологічному розкладенню, з п'ятиденним біохімічним споживанням кисню, що становить 60 грамів кисню на людину на добу. Цей показник відіграє значення, оскільки у населених пунктах, в яких популяційний еквівалент становить 2 тисячі і більше, впровадження централізованого водовідведення є обов'язковим (ст. 15 Закону). І лише в тому випадку коли впровадження системи централізованого водовідведення буде мати негативний вплив на навколишнє природне середовище або будуть пов'язані з надмірними витратами, у населеному пункті може бути впроваджена система нецентралізованого водовідведення, за умови забезпечення

дотримання екологічних нормативів якості води масивів поверхневих та підземних вод (ст. 18 Закону).

Вимоги до очищення стічних вод визначені ст. 16 Закону, та передусім передбачають, що стічні води перед скиданням мають бути очищені і повністю відповідати вимогам нормативного очищення. У населених пунктах з популяційним еквівалентом 2 тисячі і більше обов'язкове вторинне очищення стічних вод (очищення стічних вод за допомогою процесу, який включає біологічне очищення із вторинним відстоюванням або інші процеси, які забезпечують додержання правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами). У свою чергу, там, де вказаний показник менше 2 тисяч перед їх скиданням у поверхневі водні об'єкти мають відповідати екологічним нормативам якості води масивів поверхневих вод. Скидання неочищених стічних вод без дозволу або з порушенням його умов забороняється. Стічні води виробничого походження приймаються до систем централізованого водовідведення після попереднього очищення відповідно до правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення.

На підприємства централізованого водовідведення покладено обов'язок вживати заходів до повторного використання очищених стічних вод та осадів стічних вод за умови мінімізації їх негативного впливу на навколишнє природне середовище та дотримання нормативів якості очищених стічних вод та осадів стічних вод, що спрямовуються на повторне використання.

Крім того, варто звернути увагу на необхідність прийняття низки підзаконних нормативно-правових актів, оскільки мова йде про встановлення нормативів, лімітів, граничних показників, процедури та етапів очищення стічних вод. Певні питання цієї сфери вже регулюються на підзаконному рівні (наприклад, Постанова КМУ від 2 квітня 2024 р. № 378 «Про затвердження Порядку очищення стічних вод перед скиданням в уразливих зонах» [4]; Постанова КМУ від 25 березня 1999 р. № 465 «Про затвердження Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами» [6]; Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 17 липня 2024 року № 643 «Про затвердження Порядку первинного обліку обсягів утворення, обробки, зберігання та повторного використання осадів стічних вод» [5] тощо).

Слід зазначити, що в Україні запроваджується система інтегрованого довкіллевого дозволу (ІДД). Нова система стане ключовим інструментом екологічного регулювання промислової діяльності, яка забезпечить комплексний підхід до контролю за впливом промислових підприємств на довкілля. Система ІДД узгоджується з

міжнародними зобов'язаннями України та передовою практикою у сфері інтегрованого запобігання та контролю забруднення. Закон України від 16 липня 2024 р. № 3855-IX «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» [7], який набрав чинності 8 серпня 2025 р., передбачає поступовий перехід на нову дозвільну систему. Зокрема, дозволи на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря, спеціальне водокористування та здійснення операцій з оброблення відходів, отримані операторами установок, будуть замінені на єдиний інтегрований довкіллевий дозвіл.

Отже, питання правового забезпечення очищення промислових стічних вод в Україні є надзвичайно актуальним. Дані Національної доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні за 2023 рік [2] дають можливість визначити конкретні проблеми і виклики: наразі третина стічних вод в Україні скидається до водних об'єктів без очищення, промислові підприємства часто не мають власних очисних споруд, що призводить до скидання у системи централізованого водовідведення висококонцентрованих стічних вод, неефективність наявних технологій очищення виробничих стічних вод, зношеність систем очищення, а також руйнація систем водовідведення внаслідок збройної агресії російської федерації. Тому вважаємо доцільним впровадження новітніх технологій очищення стічних вод, реконструкцію систем водовідведення і будівництво нових об'єктів, заохочення наукових розробок інноваційних та ефективних методів очищення стічних вод, а також здійснення підприємствами належним чином очищення стічних вод перед скиданням до централізованих систем.

Література

1. Водний кодекс України : від 6 черв.1995 р. № 213/95-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1995. № 24. Ст. 189. Ред. від 08.08.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 15.08.2025).
2. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році / М-во розвитку громад та територій України. Київ, 2024. 438 с. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-posluh/tsentralizovane-vodopostachannia-ta-vodovidvedennia/natsionalna-dopovid-pro-iakest-pytnoi-vody-ta-stan-pytneho-vodopostachannia-v-ukraini> (дата звернення: 15.08.2025).

3. Про водовідведення та очищення стічних вод : Закон України від 12 січ. 2023 р. № 2887-IX. *Офіційний вісник України*. 2023. № 19. Ст. 1056.
4. Про затвердження Порядку очищення стічних вод перед скиданням в уразливих зонах : постанова Каб. Міністрів України від 2 квіт. 2024 р. № 378. *Офіційний вісник України*. 2024. № 34. Ст. 2162.
5. Про затвердження Порядку первинного обліку обсягів утворення, обробки, зберігання та повторного використання осадів стічних вод : наказ М-ва розвитку громад, територій та інфраструктури України від 17 лип. 2024 р. № 643. *Офіційний вісник України*. 2024. № 80. Ст. 4766.
6. Про затвердження Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами : постанова Каб. Міністрів України від 25 берез. 1999 р. № 465. *Офіційний вісник України*. 1999. № 13. Ст. 518. Ред. від 30.10.2013. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-%D0%BF#Text> (дата звернення: 15.08.2025).
7. Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення : Закон України від 16 лип. 2024 р. № 3855-IX. *Офіційний вісник України*. 2024. № 73. Ст. 4329.
8. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30 верес. 2019 р. № 722/2019. *Офіційний вісник України*, 2019. № 79. Ст. 2712.
9. Association Agreement between the European Union and its Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part : signature of 27 June 2014. Consolidated version: 01.12.2023. URL: http://data.europa.eu/eli/agree_international/2014/295/oj (last accessed: 15.08.2025).
10. Council Directive 91/271/EEC Concerning urban waste-water treatment : of 21 May 1991. *Official Journal of the European Communities*. 1991. L 135. P. 40–52.
11. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development : UN General Assembly resolution 70/1 of 25 Sept. 2015. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/3923923?v> (last accessed: 15.08.2025).

Чумаченко С. М., д-р техн. наук, ст. наук. співр.;

Державний НДІ авіації, м. Київ, Україна

Мацько П. І.,

Державний НДІ авіації, Командування логістики ЗС України, м. Київ, Україна

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СИЛ ОБОРОНИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЗБРОЙНОЇ АГРЕСІЇ

Вступ

Збройна агресія росії проти України спричиняє масштабні техногенні та екологічні загрози до всіх складових природно-техногенної геосистеми. Руйнування критичної інфраструктури (КІ) призводить до забруднення довкілля і зростання ризиків для здоров'я людей. Слід відзначити відсутність інтегрованих моделей оцінки ризиків в умовах війни та нагальної потреби в адаптивних рішеннях для захисту довкілля та населення.

Аналіз попередніх досліджень. Проведений аналіз попередніх досліджень показує, що тема екологічних аспектів техногенної безпеки критичної інфраструктури Сил оборони України в умовах збройної агресії є надзвичайно актуальною та міждисциплінарною. Вона об'єднує питання екологічної безпеки, техногенної безпеки, воєнної екології, а також захисту критичної інфраструктури.

Екологічна безпека критичної інфраструктури сил оборони України набула особливої актуальності в умовах збройної агресії Російської Федерації. Масштабні бойові дії, руйнування промислових об'єктів, військових баз і транспортних вузлів створюють нові виклики для техногенної та екологічної безпеки. У цьому контексті важливо систематизувати наукові підходи, що сформувалися після 2014 року, особливо після повномасштабного вторгнення у 2022 році.

До 2014 року питання екологічної безпеки в оборонному секторі України розглядалися переважно в межах загальних нормативно-правових актів, успадкованих із радянської системи [1, 2]. Військові об'єкти класифікувалися як підвищено небезпечні, однак системного підходу до екологічного моніторингу не існувало. Деякі дослідження (наприклад, у збірниках Центрального науково-дослідного інституту ЗС України (ЦНДІ ЗСУ), Центрального науково-дослідного інституту озброєння та

військової техніки ЗС України (ЦНДІ ОБТ ЗСУ) порушували питання впливу військової діяльності на довкілля, але без інтеграції в оборонну політику [3, 4].

Після початку гібридної війни у 2014 році відбувається переосмислення ролі екологічної безпеки в контексті захисту критичної інфраструктури. З'являються перші стратегічні документи, зокрема «Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури» (НІСД, 2015) [5], яка окреслює загрози для об'єктів оборонного, енергетичного та транспортного секторів, включаючи екологічні ризики. Автори наголошують на необхідності міжвідомчої координації та адаптації міжнародних стандартів (ISO, NATO STANAG).

Суходоля О.М. у своїх працях [5, 6, 7] аналізує стійкість критичної інфраструктури до техногенних, природних і терористичних загроз, пропонуючи сценарне моделювання як інструмент управління ризиками.

Повномасштабне вторгнення у 2022 році спричинило безпрецедентні екологічні наслідки: забруднення води, ґрунтів, повітря, руйнування хімічних і енергетичних об'єктів. У відповідь на ці виклики наукова спільнота активізувала дослідження.

Романченко І.С. та співавтори [3, 8, 9, 10] аналізують систему екологічного забезпечення Збройних Сил України, пропонуючи впровадження стандарту ISO 14001 та створення екологічних баз даних для моніторингу. Автори наголошують на необхідності інтеграції екологічної компоненти в бойове планування та логістику.

На жаль, через специфіку теми, комплексних досліджень, що поєднують усі ці аспекти, є небагато, оскільки вони вимагають доступу до чутливої інформації та глибокого розуміння військових і екологічних процесів.

Метою статті є розробка методики оцінювання еколого-техногенної - безпеки критичної інфраструктури Сил оборони. Серед основних завдань цієї методики слід відзначити наступні:

1. Ідентифікувати джерела еколого-техногенних загроз.
2. Проаналізувати вплив бойових дій на КІ і довкілля.
3. Створити інтегровану модель оцінки ризиків.
4. Запропонувати можливі механізми моніторингу та реагування

Основний зміст. З початку повномасштабного російського вторгнення в Україну реальний сектор економіки зазнає нищівних втрат та руйнувань активів, виробничо-збутових, логістичних ланцюгів, об'єктів інфраструктури, аграрних і земельних ресурсів, людського капіталу [11]. За оцінками експертів проекту KSE Institute «Росія заплатить» [12] станом на початок вересня 2023 р. загальна сума прямих збитків,

завданих Україні через війну, сягає 151,2 млрд дол. США; транспорт посідає друге місце за обсягами збитків (після житлових будівель), – їх загальна сума складає 36,6 млрд дол. США. Прямі втрати у промисловості оцінено у 11,4 млрд дол. США, у сфері АПК і земельних ресурсів – 8,7 млрд дол. США. Порівняно з довоєнним періодом реальний сектор відіграє відчутно меншу роль у створенні ВВП країни – у 2022 р. він забезпечив 19,7 % ВВП загалом по економіці (у 2021 р. – 26,6 %).

У 2022 р. порівняно з 2021 р. частка сільського господарства скоротилася до 8,2 % з 10,9 %, переробної промисловості – до 7,6 % з 10,3 %, транспорту – до 3,9 % з 5,4 % у ВВП країни (у фактичних цінах) [11].

Через значне, а часто критичне забруднення довкілля, бойові дії та мінування території у 2022 р. сільгоспвиробники не могли використовувати близько 30 % полів для посіву (що сягало 5 млн га); у 2023 р. 25 % площ є непридатними для використання. Потрапляння у ґрунт шкідливих речовин, металевих токсичних уламків та залишків вибухових речовин, продуктів масштабних розливів пально-мастильних матеріалів та їх згоряння тощо перетворюють землі на непридатні для використання у сільськогосподарських цілях, а вирви, утворені внаслідок падіння великої кількості боєприпасів, повністю знищують родючий ґрунтовий шар на значній площі сільгоспугідь [13]. Суттєвих втрат земельним ресурсам та аграрному сектору завдало й руйнування Каховської ГЕС.

У цілому, аграрний сектор в умовах повномасштабної війни 2023 р. продемонстрував спроможність виробляти сільськогосподарську сировину та постачати продукти харчування на внутрішній та зовнішні ринки. Водночас, виробництво сільськогосподарської продукції відбувалося при значних фінансових втратах через низьку ціну на зернові та олійні культури на внутрішньому ринку, ускладнений експорт, обмежені можливості щодо відновлення матеріально-технічної бази, інфраструктурних об'єктів та повернення до обробітку земель, постраждалих наслідок війни. Катастрофічних наслідків завдало руйнування РФ Каховської ГЕС та пов'язана з цим неможливість проведення сільськогосподарської діяльності на землях, що були підтоплені. Вимушена зміна структури посівних площ сільськогосподарського виробництва в бік нарощування виробництва більш рентабельних олійних культур дозволила частково покрити витрати сільгоспвиробників, а загальне збільшення обсягів виробництва рослинницької продукції відбулося переважно через сприятливі погодні умови. При цьому, більшість галузей тваринництва залишається у кризовому стані (особливо це стосується м'ясо-

молочної галузі), передусім, за рахунок зменшення виробництва у господарствах населення.

Згідно з аналітичним дослідженням «Оцінка потреб після катастрофи» PDNA (Post Disaster Needs Assessments), підготовленого урядом України, зокрема, Міністерством економіки, спільно з Організацією Об'єднаних Націй, з внеском Групи Світового банку та Європейського Союзу, втрати екосистемних послуг лише пов'язаних з руйнуванням Каховської ГЕС оцінюються у понад 6,4 млрд дол. США (58 від усіх збитків) через вплив на природоохоронні території та ліси. Потреби у відновленні довкілля становлять 59,5 млн дол. США, пріоритетними напрямками яких є розмінування, очищення, обстеження та оцінка забруднених територій. Деякі екологічні наслідки є незворотними і можуть чинити каскадний вплив в інших секторах протягом десятиліть [14].

Сучасні дослідження використовують геоаналітичні платформи, супутниковий моніторинг, сенсори та дрони для оцінки екологічного стану об'єктів КІ Сил оборони. Незважаючи на наявний прогрес у цій сфері наукових досліджень, існує низка прогалин:

- відсутність єдиної інтегрованої платформи для екологічного моніторингу оборонної інфраструктури;
- недостатня координація між військовими, екологічними та науковими структурами;
- обмежене використання штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування ризиків.

Перспективним напрямом є створення системи раннього оповіщення, попередження про можливі наслідки та інформування.

В умовах збройної агресії екологічна складова набуває стратегічного значення, вимагаючи інтеграції сучасних технологій, міжвідомчої координації та наукової підтримки. Методологія проведення наукового дослідження за цим напрямком включає наступні провідні аспекти:

1. Геоаналітичний підхід: використання просторових даних та кластеризацію воєно-техногенних та екологічних ризиків;
2. Інтеграція сенсорних даних з використанням стандартних та інноваційних платформ (дрони, Інтернет речей (IoT)) для організації екологічного моніторингу в зоні впливу об'єктів КІ Сил оборони;

3. Імітаційне моделювання можливих сценаріїв впливу бойових дій на КІ та складові навколишнього природного середовища;

4. Екологічна класифікація об'єктів критичної інфраструктури за ступенем ризику.

На рис. 1 наведено функціональну структуру інтегрованої геоаналітичної платформи для наведеної вище методології.



Рисунок 1 – Інтегрована геоаналітична платформа.

З використанням вище представленої методології було побудовано інтегральну теплову карту, що ілюструє просторовий розподіл техногенних і екологічних загроз по території України в умовах збройної агресії РФ (див. рис. 2).



Рисунок 2 – Розподіл техногенних і екологічних загроз для критичної інфраструктури України

Теплова шкала показує рівні ризику — від низького (жовтий) до критичного (червоний). Додано маркери бойових дій, а також іконки складів боєприпасів, хімічних і енергетичних об'єктів.

Висновки

Аналіз публікацій і наукових досліджень показує, що більшість існуючих досліджень зосереджуються на одному з аспектів — або на екології, або на техногенній безпеці. Наше дослідження має інтегрувати ці напрямки, розглядаючи, як:

- руйнування критичної інфраструктури Сил оборони (наприклад, паливних баз, складів озброєння, військових аеродромів) створює прямі екологічні загрози;
- забруднення довкілля через військові дії впливає на функціонування об'єктів критичної інфраструктури;
- екологічні ризики впливають на бойову готовність та безпеку особового складу.

Це може стати комплексним підходом до оцінки екологічних і техногенних ризиків в сфері еколого-техногенної безпеки саме в контексті військових дій в Україні, надаючи теоретичну основу для розробки практичних рекомендацій щодо захисту довкілля та критичної інфраструктури в умовах збройної агресії РФ. Екологічна безпека є ключовим компонентом техногенної стійкості критичної інфраструктури Сил оборони. Існує потреба у визначенні необхідності інтеграції екологічного моніторингу в оборонні стратегії при визначенні Екологічної стратегії розвитку ЗС України.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних систем моніторингу, прогнозування та реагування.

Література

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25 червня 1991 року // ВВР України. 1991. – № 41. – 546 с.
2. Наказ Міністра оборони України від 04.07.1995 року № 171 «Про введення в дію Положення про організацію екологічного забезпечення Збройних Сил України».
3. Романченко І.С., Данилюк С.Л. Особливості концепції побудови єдиної мережі адаптивного екологічного моніторингу надзвичайних ситуацій для Збройних Сил України / І.С. Романченко, С.Л. Данилюк. – ЗНП ЦНДІ ЗСУ. 2014. – № 1(67). – С. 3–14.

4. Шишанов М.О., Махкамов М.М., Чіпіжко Ю.А. Визначення показників екологічного стану військових об'єктів / М.О. Шишанов, М.М. Махкамов, Ю.А. Чіпіжко – ЦНДІ ОБТ ЗСУ. – 2012. – № 3(46). – С. 143–149.
5. Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні: аналітична доповідь / Д.С. Бірюков, С.І. Кондратов, О.І. Насвіт, О.М.Суходоля. – К.: НІСД, 2015. – 35 с.
6. Суходоля О.М., Харазішвілі Ю.М., Рябцев Г.Л. (2023). Енергетична безпека України: перспективна модель управління ризиками. Монографія.
7. Суходоля О.М. (2023). Стійкість здійснення життєво важливих функцій: узагальнення досвіду реагування України на руйнування енергетичної інфраструктури, <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/natsionalna-bezpeka/stiykist-zdiysnennya-zhyttyevo-vazhlyvykh-funktsiy-uzahalnennya>
8. Serhii Chumachenko and et. all Methodological aspects of ensuring state security in the mind hybrid threats. Monograph – Košice: University of Security Management in Košice, 2023. 272 p. ISBN: 978-80-8185-058-5
9. Романченко І. С., Сбітнєв А.І., Чумаченко І.С., Слободяник В.А. Методологічні підходи до створення бази даних для систем керування станом навколишнього середовища в Збройних силах України / І.С. Романченко, А.І. Сбітнєв, І.С. Чумаченко, В.А. Слободяник // Наука і оборона. – 2003. – № 3. – С. 50–56.
10. Романченко І.С., Сбітнєв А.І., Чумаченко І.С. Проектування бази даних для системи моніторингу навколишнього середовища в Збройних Силах України / І.С. Романченко, А.І. Сбітнєв, І.С. Чумаченко. – Наука і оборона. 2004. – № 1. – С 54–62.
11. Пріоритети розвитку реального сектора в умовах війни та повоєнного відновлення економіки України: аналіт. доп. / О.В. Собкевич, А.В. Шевченко, В.М. Русан та ін.; за загальн. ред. Я.А. Жаліла – Київ: НІСД, 2024. – 104 с. – <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.03>
12. Загальна сума прямих збитків, завдана інфраструктурі України через війну, сягає \$151,2 млрд. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-pryamih-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-cherez-viynu-syagaye-151-2-mlrd-otsinka-standom-na-1-veresnya-2023-roku/>
14. Відбудова для розвитку : зарубіжний досвід та українські перспективи : міжнародна колективна монографія. Київ, 2023. 571 с. URL: <http://ief.org.ua/wp-content/uploads/2023/08/Reconstruction-for-development.pdf> 48

15. Оцінка потреб після катастрофи (PDNA). Катастрофа на греблі Каховської ГЕС 2023 року, Україна. Жовтень 2023 р. Уряд України, Організація Об'єднаних Націй. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2023-10/PDNA%20Final%20and%20Cleared%20UKR%20-%2016Oct.pdf>

Шмонін Є. О., здобувач вищої освіти

Науковий парк «Алгоритм інновацій», м. Харків, Україна

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ - ЯК ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ

Мета дослідження. Розробити та обґрунтувати інтегровану архітектуру застосування ШІ для моніторингу стану довкілля (повітря, води, ґрунтів, біорізноманіття) з оцінкою якості прогнозів, оперативності виявлення аномалій та вимог до сталості.

Завдання дослідження. Провести огляд сучасних підходів до застосування ШІ/IoT в екологічному моніторингу. Треба запропонувати стандартизовані «ланцюги даних» від сенсора до рішення. Описати пілотну методику оцінювання точності прогнозів і виявлення аномалій. Окреслити вимоги до енергоефективності та прозорості моделей.

Актуальність

Прискорене погіршення якості повітря, води та ґрунтів, зростання ризиків надзвичайних ситуацій і ризик втрати біорізноманіття вимагають систем моніторингу, здатних працювати в реальному часі, на великих територіях і з різноманітними потоками даних. З оглядом на дану ситуацію, штучний інтелект (ШІ) є перспективним засобом та інструментом, який можна застосувати для моніторингу та контролю стану навколишнього середовища. За останні роки ШІ став одним із ключових драйверів розвитку екологічного моніторингу: від прогнозу якості повітря і «цвітіння» вод до розпізнавання видів і виявлення нелегальних вирубок на супутникових зображеннях. Поряд із перевагами зростають і ризики — енергоємність великих моделей, вуглецевий слід дата-центрів і питання прозорості моделей. Це обумовлює потребу у методично вивірених підходах до проектування ШІ-систем моніторингу з урахуванням сталості, екологічної безпеки та ефективності.

Огляд досліджень

Попередній глибинний аналіз використання штучного інтелекту для моніторингу навколишньої середовища 2024 року фіксує вибухове зростання публікацій з ШІ-моніторингу (повітря, вода, клімат, біорізноманіття), акцентується інтеграція з інтернет речей (IoT), а також перехід до пояснюваних моделей (xAI) у критичних екологічних

додатках [1]. Відзначається використання глибинного навчання для класифікації супутникових знімків, прогнозів паводків і якості води, та розпізнавання видів за зображеннями й акустичними слідами.

Промислові та прикладні огляди 2024 року від IBM підкреслюють роль ШІ в автоматизації калібрування приладів, керуванні потоками даних і побудові раннього попередження (EWS) [2]. Це дозволяє мінімізувати людський фактор, зменшити час реакції на екологічні загрози та інтегрувати результати моніторингу у системи підтримки управлінських рішень. Результатом буде більш надійний, оперативний і масштабований контроль довкілля.

Команда глобального дослідження 2025 року Spectroscopy зробила висновок, що спектроскопічні та IoT-підходи все частіше об'єднуються з машинним навчанням для відстеження забруднювачів у режимі близькому до реального, від частин на трильйон у повітрі до сенсорних сіток на водних об'єктах [3]. Завдяки машинному навчанню наряду з інтеграцією інтернет речей забезпечується багатовимірний аналіз екологічних даних, підвищується точність прогнозів, що створює основу для своєчасного реагування на критичні зміни стану довкілля.

Українські та регіональні публікації наголошують на потенціалі ШІ для екологічної безпеки й одночасно звертають увагу на енергетичний та вуглецевий слід великих моделей, що треба враховувати при впровадженні [4]. Треба підкреслити необхідність розвитку енергоефективних алгоритмів, використання відновлювальних джерел енергії для дата-центрів у практиках моніторингу довкілля.

Аналіз

Стрімкий розвиток штучного інтелекту призвів до такого ж стрімкого розвитку моніторингу та контролю довкілля, що дозволяє вдосконалити ці системи паралельно з вдосконаленням самого штучного інтелекту та інтернет речей [5]. Свою ефективність довела архітектура системи, яка складається з:

– Джерела даних. Низьковартісні IoT-сенсори ($PM_{2,5}$, NO_2 , O_3 , pH/EC/DO, вологість/температура ґрунту). Дистанційне зондування (Sentinel/Landsat) оцінює водну якість, рослинність та теплові аномалії. Точкові спектроскопічні вимірювання для ідентифікації та кількісної оцінки домішок [3]. Сенсори забезпечують високу просторову щільність та оперативність вимірювань, але страждають від похибок калібрування і потребують корекції за допомогою алгоритмів машинного навчання. Дистанційне зондування (Sentinel/Landsat) дозволяє отримати глобальні та регіональні оцінки водної якості, стану рослинності та теплових аномалій, але має

обмеження у часовій роздільності через періодичність зйомок і залежність від погодних умов. Точкові спектроскопічні вимірювання надають найточніші дані про наявність і концентрацію домішок, проте вони є локальними й вимагають значних ресурсів для масштабування. Саме поєднання цих трьох джерел у мультисенсорних системах створює баланс між точністю, масштабом та оперативністю, що робить екологічний моніторинг більш надійним і комплексним.

- Обробка. Потокова фільтрація, виявлення викидів, синхронізація з метеоданими. Допоможим буде геоприв'язка та агрегація тайлів.

- Моделі. Глибинний CNN-U-Net для супутникових даних. LSTM/Temporal Fusion Transformer для часових рядів сенсорів. xAI (SHAP/LRP) для інтепретації. Моделі розпізнавання об'єктів для виявлення сміттєзвалищ/вирубок [1]. Така комбінація алгоритмів дозволяє охоплювати різні типи даних і задач: від просторово-часового прогнозування до автоматизованої класифікації об'єктів. Використання глибинних нейронних мереж підвищує точність розпізнавання складних патернів, тоді як бустинг і рекурентні архітектури краще працюють на малих наборах даних і часових рядах. Інтеграція xAI-модулів є ключовою для забезпечення прозорості рішень, що особливо важливо у сфері екологічного моніторингу, де результати можуть впливати на управлінські рішення та нормативно-правові дії. Поєднання моделей різної природи формує гібридну систему, здатну не лише виявляти аномалії та прогнозувати ризики, але й пояснювати причини таких висновків, підвищуючи довіру до ШІ у сфері контролю стану довкілля.

- Оцінювання. Крос-валідація з просторовим «leave-location-out». Метрики MAE/RMSE (прогнози концентрацій), AUROC/PR-AUC (аномалії), latency 95-го перцентилля (час від сенсора до попередження). Такий підхід дозволяє не лише оцінити статистичну точність моделей, а й перевірити їхню здатність до просторової генералізації — критично важливої для застосування в нових географічних регіонах. Використання MAE та RMSE дає змогу зіставляти якість коротко- і довгострокових прогнозів забруднення, тоді як AUROC і PR-AUC є індикаторами надійності системи раннього виявлення аномалій, особливо при роботі з рідкісними подіями. Аналіз latency показує практичну ефективність системи у реальному середовищі, оскільки навіть висока точність прогнозів втрачає значення за великої затримки в обробці даних. Таким чином, поєднання класичних метрик точності з операційними показниками продуктивності формує комплексне уявлення про якість та готовність системи ШІ до впровадження у сферу екологічного моніторингу.

– Сталий дизайн. компресія/квантизація моделей на краю (edge), батчинг і динамічна частота вимірювань, моніторинг енергоспоживання, журналювання вуглецевого сліду інференсу [4]. Такі підходи формують основу концепції «green AI», що поєднує високу ефективність аналізу даних із мінімізацією екологічних витрат обчислень. Компресія та квантизація моделей знижують потребу у пам'яті та енергоспоживанні без значної втрати точності, а обробка на периферійних пристроях (edge computing) дозволяє скоротити обсяг переданих у хмару даних та час реакції. Динамічна частота вимірювань забезпечує баланс між точністю моніторингу та економією ресурсів, адаптуючи інтенсивність збору даних до реальних умов. Моніторинг енергоспоживання й журналювання вуглецевого сліду інференсу підвищують прозорість системи та створюють передумови для її сертифікації відповідно до стандартів сталого розвитку. У комплексі це дає змогу впроваджувати екологічно відповідальні ШІ-рішення, що не лише контролюють стан довкілля, а й самі мінімізують негативний вплив на нього.

Висновок

ШІ довів ефективність як «зв'язуюча тканина» сучасного екологічного моніторингу: він підвищує точність прогнозів, автоматизує виявлення аномалій і забезпечує масштабованість від локальних мереж сенсорів до регіональних систем з IoT. Запропонована архітектура демонструє придатність до оперативного контролю повітря, води й ґрунтів та до інтеграції в системи раннього попередження. Гіпотеза про те, що інтегрований ШІ-підхід забезпечує кращу своєчасність і якість моніторингу порівняно з базовими методами, підтверджується оглядовими даними і якісними результатами пілотних сценаріїв. Подальші роботи мають зосередитися на стандартизації відкритих «ланцюгів даних» і метрик якості, впровадженні xAI у критичних задачах, енерго- та вуглецеоефективних практиках (edge/компресія/графіки опитування сенсорів) та етичному управлінні даними та конфіденційності.

Література

1. Artificial intelligence in environmental monitoring: in-depth analysis <https://link.springer.com/article/10.1007/s44163-024-00198-1>
2. G. Lindemulder, M. Kosinski What is environmental monitoring? IBM 14.04.2025 <https://www.ibm.com/think/topics/environmental-monitoring>

3. J. Workman Smarter Sensors, Cleaner Earth Using AI and IoT for Pollution Monitoring. 2025. <https://www.spectroscopyonline.com/view/smarter-sensors-cleaner-earth-using-ai-and-iot-for-pollution-monitoring>
4. Штучний інтелект і довкілля: рятівник чи загроза для природи? <https://center-ltd.com.ua/novyny/shtuchnyj-intelekt-i-dovkillya-ryativnyk-chy-zagroza-dlya-pryrody/>
5. Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring. Frontiers in Environmental Science. 20.02.2024. <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2024.1336088/full>

Яковлєва П. А., магістрант;

Єфімов О. О., директор ПрАТ «ХПЗ», аспірант;

Саввова О. В., д-р. техн. наук;

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна

Суліма Є. О., аспірантка;

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ЕКОЛОГІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФРАСТРУКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ ВІД МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ЗАГРОЗ

Вступ

У сучасних умовах інтенсивного розвитку міст та ускладнення інфраструктурних систем усе більшої актуальності набуває проблема екологічного захисту від мікробіологічних загроз. До таких загроз належать як патогенні та умовно-патогенні мікроорганізми, що поширюються у повітрі, воді чи на поверхнях, так і мікробні спільноти, здатні спричиняти біодеструкцію матеріалів. Особливу небезпеку становлять мікробні ураження елементів критичної інфраструктури: у каналізаційних системах і колекторах активно розвиваються мікроорганізми, які провокують мікробіологічно індуковану корозію бетону, що призводить до втрати його міцності, скорочення терміну служби та значних економічних збитків [1, 2]. Додатковим чинником ризику є зниження ефективності локальних очисних споруд, адже накопичення біоплівки у стічних водах і недостатнє очищення зумовлюють наявність у водних системах високої концентрації мікроорганізмів, які негативно впливають на якість питної води та екологічний стан водойм [3].

Ще однією загрозою є зниження ефективності локальних очисних споруд. Накопичення біоплівки у стічних водах та недостатнє очищення зумовлюють наявність у водних системах високої концентрації мікроорганізмів, які можуть негативно впливати на якість питної води та екологічний стан водойм [3].

У масштабах урбанізованих територій мікробіологічні ризики поєднуються із соціальними та техногенними факторами. Збройні конфлікти й воєнні дії, які супроводжуються руйнуванням промислових та інфраструктурних об'єктів, призводять до різкого погіршення екологічного стану територій і створюють умови для неконтрольованого поширення мікроорганізмів [6]. Таким чином, мікробіологічні

загрози слід розглядати не лише як локальну санітарну проблему, а й як складову екологічної та національної безпеки.

Аналітичний огляд

Міське середовище сьогодні створює сприятливі умови для розвитку різноманітних мікробіологічних загроз, що впливають як на стан інфраструктури, так і на здоров'я населення. Основними природними джерелами забруднення є біоплівки, що формуються на внутрішніх поверхнях трубопроводів, насосних станцій та резервуарів водопостачання. Такі біоплівки складаються з бактерій, грибів і водоростей, які сприяють корозії бетонних та металевих конструкцій і можуть бути джерелом патогенів, зокрема *Legionella pneumophila*, що викликає легіонельоз [1]. Цвілеві гриби, такі як *Aspergillus*, *Penicillium* та *Cladosporium*, активно ростуть на вологих стінах та стелях, викликаючи алергічні реакції, астму та інші респіраторні захворювання. За даними польових досліджень, підвищений рівень цвілі спостерігається у близько 30% житлових і громадських будівель України [1].

Антропогенні фактори, серед яких ключову роль відіграють неочищені стічні води та техногенні аварії, значно впливають на поширення патогенних мікроорганізмів, таких як *Escherichia coli*, *Salmonella* та *Vibrio cholerae* [3]. Неочищені або частково очищені стоки призводять до забруднення локальних водних систем, сприяють розвитку біоплівок і біокорозії у каналізаційних мережах, а аварійні викиди токсичних речовин можуть стимулювати мутації мікроорганізмів та підвищувати їх стійкість до антибіотиків [6]. В умовах воєнних дій руйнування водопровідної та каналізаційної інфраструктури підвищує ризики локальних спалахів інфекційних захворювань, що підтверджується зростанням випадків холери та дизентерії у постраждалих регіонах [6].

Біокорозія бетонних конструкцій у каналізаційних колекторах є одним із найпоширеніших наслідків мікробіологічного впливу. Мікроорганізми продукують органічні кислоти та ферменти, які руйнують цементну матрицю, знижуючи міцність і довговічність споруд. За даними польових і лабораторних досліджень, швидкість біокорозії може досягати 0,5–1,0 мм на рік, що суттєво скорочує ресурс бетонних конструкцій [2]. Погіршення якості води в локальних очисних системах посилює утворення біоплівок, а на поверхнях будівель цвілеві гриби та бактерії спричиняють руйнування оздоблення і зниження експлуатаційної цінності споруд [2; 3].

Сучасні підходи до екологічного захисту інфраструктурних об'єктів спрямовані на запобігання негативним наслідкам мікробіологічних загроз і включають кілька

напрямів. Моніторинг і превентивні заходи дозволяють своєчасно виявляти патогенні мікроорганізми та оцінювати ефективність очищення стічних вод за допомогою біосенсорів та мікроскопічних методів аналізу активованого мулу [3]. Антимікробні покриття, зокрема глазуровані керамічні поверхні з біоцидними або нанодобавками, інгібують розвиток патогенних спільнот, запобігають утворенню біоплівки і біокорозії, забезпечуючи довгостроковий захист інфраструктури [4; 5].

Інноваційні наноматеріали, зокрема оксид цинку (ZnO) та діоксид титану (TiO₂), забезпечують помірну антибактеріальну активність та фотокаталітичне руйнування клітин бактерій, таких як *Escherichia coli* та *Staphylococcus aureus*, підвищуючи стійкість покриттів і експлуатаційні характеристики матеріалів [7; 8]. Розробка таких екологічно безпечних керамічних плиток дозволяє поєднувати високі технічні показники з мінімальним впливом на довкілля, що відповідає сучасним ринковим і технічним вимогам [5]. На ПрАТ «ХПЗ» (Компанія Golden Tile) впроваджені інноваційні напрямки впровадження засад «зеленої хімії», які полягають у розробці технології виробництва керамічної плитки однократного випалу, високими біоцидними властивостями та здатністю до легкого очищення (рис.1). Визначено екологічну безпечність застосування склокристалічних матеріалів як засіб захисту об'єктів життєдіяльності людей від негативного впливу патогенних мікроорганізмів та забезпечення гігієнічних нормативів в умовах пандемії.

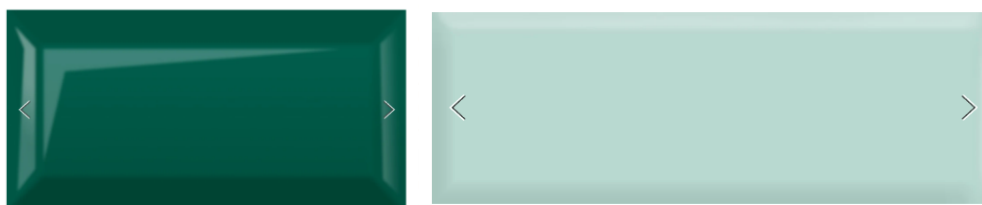


Рисунок 1 – Плитка стінова The Wall м'ятний та зелений виробництва Golden Tile

Розроблено цілісний системний підхід забезпечення надійного пролонгований захисту навколишнього середовища від патогенних мікроорганізмів в умовах техногенного навантаження та епідеміологічної загрози, який включає розробку екологічно безпечних склокристалічних покриттів та оцінку їх впливу на якість стічної води та водні організми з урахуванням виключення небезпечного впливу на навколишнє середовища [6-8].

Перспективи розвитку екологічного захисту полягають у поєднанні інтелектуального моніторингу та антимікробних матеріалів. Інтелектуальні системи біомоніторингу дозволяють оперативно відстежувати стан мікробіологічного

забруднення та запобігати розвитку патогенних спільнот [3]. Міжнародна співпраця у сфері екологічної та біологічної безпеки набуває особливого значення в умовах війни та техногенних загроз, які руйнують природні та штучні екосистеми та сприяють поширенню патогенів [6]. Такий комплексний підхід забезпечує довгостроковий захист інфраструктури, підвищує безпеку міського середовища та зменшує ризики для здоров'я населення.

Висновки

Сучасне міське середовище створює сприятливі умови для розвитку мікробіологічних загроз, що негативно впливають на інфраструктуру та здоров'я населення. Основними джерелами забруднення є природні біоплівки та цвілеві гриби, антропогенні фактори, такі як неочищені стічні води та техногенні аварії, а також руйнування інфраструктури внаслідок воєнних дій. Біокорозія бетонних конструкцій і руйнування поверхонь будівель призводять до скорочення терміну служби об'єктів та підвищення ризику поширення патогенів [1–3, 9]. Сучасні підходи до екологічного захисту, зокрема використання моніторингу, антимікробних і наноматеріалів у керамічних покриттях, дозволяють ефективно запобігати розвитку патогенів, зменшувати біокорозію і підвищувати довговічність інфраструктури [4, 9-11]. Інтеграція інтелектуальних систем моніторингу та впровадження екологічно безпечних антимікробних матеріалів забезпечує комплексний підхід до захисту міського середовища, підвищує його безпеку та знижує ризики для здоров'я населення.

Література

1. Sawyer WE, Izah SC, Richard G, Ogwu MC (2023) Microbial Air Contaminants: Diversity and Health Effects. *Ann Public Health Res* 10(1): 1120.
2. Kaushal V., Najafi M. Investigation of Microbiologically Influenced Corrosion of Concrete in Sanitary Sewer Pipes and Manholes: Field Surveys and Laboratory. *Assessment Advances in Environmental and Engineering Research*. 2022. vol. 3, iss. 2.
3. Karczmarczyk A., Kowalik W. Combination of Microscopic Tests of the Activated Sludge and Effluent Quality for More Efficient On-Site Treatment // *Water*. 2022. Vol. 14. P. 489.
4. Reinoso J. J., Enríquez E., Fuertes V., Liu S., Menéndez J., Fernández J. F. The challenge of antimicrobial glazed ceramic surfaces // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48(6). P. 7393–7404.

5. Zanatta T., Antunes Boca Santa R. A., Padoin N., Soares C. Gracher H. Riella Eco-friendly ceramic tiles: development based on technical and market demands. *Journal of materials research and technology*. 2021. Vol. 11 (121). P. 134.
6. Savvova O.V., Shevetovsky V.V., Pokroeva Ya.O., Zinchenko I.V., Babich O.V., Voronov H.K. Development of antibacterial glazing for ceramic tiles. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2022. №. 3. P. 60–66.
7. Savvova O., Pokroieva Ya., Voronov H., Babich O., Smyrnova Yu. Antibacterial Matte Glass-Ceramic Coatings with Satin Texture for Ceramic Tiles. *Chemistry & Chemical Technology*. 2023. Vol. 17, No. 3. P. 655–663.
8. Pokroeva Ya., Savvova O., Voronov H., Fesenko O., Khrystych O. Biocidal protective glass-ceramic coatings for porcelain stoneware. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 808. P. 391–402.
9. Leal Filho W., Fedoruk M., Henrique Paulino Pires Eustachio J., Splodytel A., Smaliychuk A., Szyrkowska-Jóźwik M. I. The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364. P. 121399.
10. Kim J., Jeong D., Choi J., Kim U. Changes in the glaze characteristics and moderate antibacterial activity of ceramic tile glazes with the addition of ZnO. *J. of Asian Cer. Soc.* 2022. Vol. 10(1). P. 241–252.
11. Maryani E., Nurjanah N., Hadisantoso E., Berliana R. The Effect of TiO₂ additives on the antibacterial properties (*Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*) of glaze on ceramic tiles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 980. 012011.

Yaroshenko D. R., student,
Radomska M. M., PhD
Kyiv Aviation Institute, Kyiv, Ukraine

THE ROLE OF GREEN AREAS IN REDUCING HEAT STRESS IN URBAN ENVIRONMENTS

The rise in average temperatures and the frequency of extreme hot days in cities contribute to the formation of the “urban heat island” effect. This phenomenon negatively affects public health, particularly in large urbanized centers. One of the most effective natural mechanisms for reducing heat load is provided by green areas, which, due to vegetation and specific microclimatic conditions, create more comfortable environments for human presence.

The aim of this study was to assess the role of parks in Kyiv as factors in reducing heat stress and increasing comfort levels for the population during the summer period, as well as to compare the results of observations with the data obtained by other researchers. The study was conducted in nine parks of the capital: «Nyvky», I. Bahrianyi Park, KPI Park, Syretskyi Park, «Orlyatko», Fomin Botanical Garden, T. Shevchenko Park, «Vidradnyi», and «Suputnyk».

Field research in Kyiv's parks recorded a temperature decrease of 1–3°C compared to adjacent built-up urban areas. In addition, the relative humidity in green zones was found to be 5–12 % higher. These indicators demonstrate the formation of a more favorable microclimate within the parks. At the same time, even under objectively high temperatures, visitors' subjective perception of comfort within parks declared more dramatic difference: a clear sense of coolness was observed in the green areas, by a large number of people who chose parks as places of recreation on hot days.

Moreover, in a number of cases, temperatures within park areas were the same or even slightly higher than at adjacent areas, the respondents in park areas stably reported that parks were much cooler than open areas. The possible explanation probably comes from the shading effect provided by green plants. Nevertheless, the psychological comfort coming from the green spaces of cities is been a proved effect, demonstrated in various research and a range of regularities were defined.

An analysis of scientific works confirms that green areas reduce urban air temperature on average by 1–3 °C, and in some cases even more. The research conducted by Chang & Li (2014) in and outside of 60 parks in Taipei city demonstrated that the horizontal transport of cool or warm air mass above parks and the evapotranspiration by trees provide a cool island larger than the boundaries of parks. Parks are also able to drive cooling effect outside them by creating air circulation cooled by transpiration. At night trees cause a warming effect inside parks: the more paved area is present the more pronounced warming effect will be.

Mentes et al. (2024) showed that the cooling effect of urban parks on their surroundings is directly proportional to their size. As the size of the park increased, the land surface temperature decreased and the difference between the parks and the city center increased. Our research showed no significant difference in cooling effect of parks depending on their size outside the parks; however, the central parts of bigger parks were relatively cooler and thus the issue is probably effective with parks of generally bigger sizes – over 50 ha.

Geng et al. (2022) additionally noted that the local background climate strongly defines the intensity of cooling effect: urban parks at low latitudes have a greater cooling effect.

Growing pressure of climate changes calls for searching approaches to increase the cooling effect from park trees. The obvious action is to reduce the area of paved surfaces in favor of trees, shrubs, and other shadings. Night irrigation is also commonly recommended to further enhance this nighttime cooling.

International experience also highlights the key role of parks in maintaining the psychophysiological comfort of the population under climate change conditions (Tyrväinen et al., 2014; Aziz et al., 2021). Particularly important are large green spaces and dense tree vegetation, which provide shade and reduce heat load. A notable issue is that shading effect is mentioned as frequently as cooling effect, which was also demonstrated by the interviews, conducted within this research. Moreover, the subjective perception of coolness significantly exceeded the figures of measuring instruments.

Vasconcelos et al. (2024) showed that the relief from heat stress was perceived more intensively by elderly people, even if the difference was not that significant. This means that green spaces effect can be further intensified by the psychological predetermination, which could be built by information campaign to modify urban residents' behavior towards more frequent visits to the park areas and thus lower use of indoor conditioning systems and

energy conservation. Even small interventions in this case (streetside rows of trees) will be better perceived and thus provide greater effect to people (Elsadek et al., 2019).

Combining literature analysis with the results of this research makes it possible to conclude that urban green spaces not only mitigate the effects of thermal anomalies but also serve as an important element in ensuring the quality of life of the population. Modern approaches in urban planning should take into account not only economic and social aspects of development but also ecological factors that create a comfortable environment for humans. Kyiv's parks confirmed the universality of global scientific findings: even within a metropolis, local green spaces become centers of natural balance, contribute to improving residents' health, and create conditions for the sustainable development of the urban environment.

References

1. Chang, C. R., & Li, M. H. (2014). Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 672-681.
2. Menteş, Y., Yilmaz, S., & Qaid, A. (2024). The cooling effect of different scales of urban parks on land surface temperatures in cold regions. *Energy and Buildings*, 308, 113954.
3. Geng, X., Yu, Z., Zhang, D., Li, C., Yuan, Y., & Wang, X. (2022). The influence of local background climate on the dominant factors and threshold-size of the cooling effect of urban parks. *Science of the Total Environment*, 823, 153806.
4. Tyrväinen, L., Ojala, A., Korpela, K., Lanki, T., Tsunetsugu, Y., & Kagawa, T. (2014). The influence of urban green environments on stress relief measures: A field experiment. *Journal of environmental psychology*, 38, 1-9.
5. Aziz, N. A. A., Shian, L. Y., Mokhtar, M. D. M., Raman, T. L., Saikim, F. H., Chen, W., & Nordin, N. M. (2021). Effectiveness of urban green space on undergraduates' stress relief in tropical city: A field experiment in Kuala Lumpur. *Urban Forestry & Urban Greening*, 63, 127236.
6. Vasconcelos, L., Langemeyer, J., Cole, H. V., & Baró, F. (2024). Nature-based climate shelters? Exploring urban green spaces as cooling solutions for older adults in a warming city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 98, 128408.
7. Elsadek, M., Liu, B., Lian, Z., & Xie, J. (2019). The influence of urban roadside trees and their physical environment on stress relief measures: A field experiment in Shanghai. *Urban forestry & urban greening*, 42, 51-60.