



ЗАБУЛОНОВ
Юрій Леонідович —
академік НАН України,
директор Державної установи
«Інститут геохімії
навколишнього середовища
Національної академії наук
України»

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПЕРЕРОБКИ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНО- ПАЛИВНОГО ЦИКЛУ З МЕТОЮ ДОСЯГНЕННЯ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ДЕРЖАВИ

**Стенограма доповіді на засіданні Президії
НАН України 5 лютого 2025 року**

У доповіді розглянуто участь установ НАН України у вирішенні актуальних і стратегічно важливих науково-технічних завдань із впровадження інновацій для розв'язання екологічних проблем, пов'язаних з поводженням із радіоактивними відходами. Зазначено, що в період повоєнного відновлення України розроблення та впровадження комплексного методу повної утилізації радіоактивних відходів із вилученням цінних матеріалів може стати проривною технологією та фундаментом інноваційного розвитку багатьох наукових напрямів.

Шановний Анатолію Глібовичу!

Шановні члени Президії!

Ми всі добре розуміємо, наскільки важливою сьогодні є ядерна енергетика для забезпечення стійкості держави загалом та її енергетичної стабільності зокрема. Стратегічна значущість цієї галузі, особливо під час війни, полягає в тому, що саме ядерна енергетика переважно забезпечує підприємства та населення України електроенергією і теплом. У довоєнний період частка ядерної енергетики в загальному виробництві електроенергії в Україні перевищувала 50 %, а зараз, звісно, стала ще більшою. І в повоєнний час це важливе джерело електроенергії, безперечно, забезпечуватиме енергетичну безпеку та розвиток економіки нашої держави, а також дозволить зменшити залежність від імпортних енергоносіїв, таких як природний газ та вугілля, що особливо важливо в умовах геополітичної нестабільності.

Стратегія розвитку ядерної енергетики в Україні постійно перебуває у фокусі уваги керівництва нашої держави. Ключовими цілями цієї стратегії є, по-перше, забезпечення енергетич-

ної безпеки країни, по-друге, зниження рівня викидів парникових газів і, по-третє, розвиток економіки. Для досягнення цих цілей потрібно вирішувати такі завдання:

- 1) підтримання роботи та модернізація наявних АЕС;
- 2) будівництво нових атомних енергоблоків;
- 3) розвиток власного ядерно-паливного циклу;
- 4) впровадження нових технологій;
- 5) підвищення ядерно-радіаційної безпеки.

В Україні, як, до речі, й у багатьох інших країнах світу, які використовують ядерну енергію, немає повного замкненого ядерно-паливного циклу, але є його окремі елементи. До ядерної галузі крім АЕС у нас входить досить значна кількість підприємств ядерно-паливного циклу — уранові родовища, заводи з перероблення уранової сировини тощо. В ядерній промисловості України задіяно численний кадровий потенціал фахівців — науковців, конструкторів, інженерів, що створює підґрунтя для розроблення власних технологій.

У процесі функціонування ядерно-паливного циклу практично на всіх його етапах виникають і накопичуються доволі великі обсяги радіоактивних відходів (РАВ). Ці відходи мають різний агрегатний стан, різні періоди напіврозпаду, різну активність та склад випромінювання. Наприклад, при отриманні 1 т уранового концентрату в середньому утворюється понад 1000 т відходів, а один блок АЕС за рік продукує 20—30 т відпрацьованого ядерного палива (ВЯП). Щороку в Україні утворюються десятки мільйонів тонн РАВ першого класу небезпеки — це сукупні відходи видобутку, збагачення урану та функціонування АЕС. Причому обсяги накопичених на території України РАВ постійно зростають. Якщо у 2010 р. налічувалося 0,7—1,0 млрд т радіоактивних відходів, то в 2024 р. їх було вже близько 6—7 млрд т.

Отже, накопичення радіоактивних відходів, особливо в умовах широкомасштабної війни, коли значно підвищуються ризики потенційних техногенних катастроф, становить значну загрозу для екологічної безпеки та здоров'я населення. Тому розроблення та впровадження новітніх технологій перероблення й утилізації

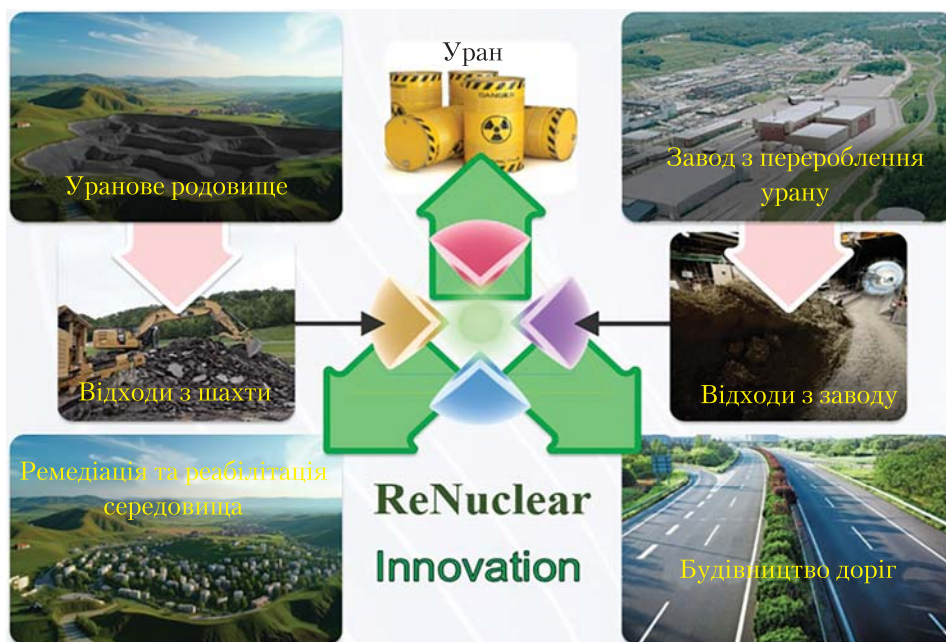
радіоактивних відходів є критично важливим завданням. На жаль, стандартні технології, які сьогодні використовують у світі, а також відпрацьовують у нашій державі, не дозволяють зробити якийсь революційний крок у вирішенні цієї проблеми. Потрібен певний технологічний стрибок, який може стати, як зараз кажуть, геймченджером, тобто дасть змогу змінити правила гри, а саме: стратегію поводження з РАВ, щоб досягти рівня економічно доцільної господарської діяльності.

Загалом стратегія Game Changer — це інноваційний підхід до вирішення складних проблем, який передбачає фундаментальне змінення правил гри та створення нових можливостей. Така стратегія ґрунтується на використанні комплексних інноваційних технологій та нестандартних рішень для досягнення проривних результатів.

Застосування стратегії Game Changer до проблеми РАВ полягає в тому, що вона пропонує не просто поліпшити наявні на сьогодні методи поводження з відходами, а фундаментально змінити підхід до вирішення цієї проблеми. Замість простого зберігання РАВ стратегія Game Changer орієнтована на їх перероблення та використання як цінного ресурсу. Це дозволить не лише вирішити проблему РАВ, а й отримати економічні та екологічні вигоди, зокрема:

- *зменшення обсягів РАВ* — завдяки впровадженню нових технологій перероблення можна значно зменшити кількість відходів, які потребують зберігання та захоронення;
- *вилучення цінних компонентів* — деякі РАВ містять цінні матеріали, які можна вилучити й використати повторно, що дасть змогу зменшити залежність від видобутку нових ресурсів та зберегти природні багатства;
- *зниження ризиків* — упровадження сучасних технологій переробки РАВ дозволить підвищити рівень безпеки та мінімізувати ризики для довкілля і здоров'я людей;
- *створення нових можливостей* — розвиток інноваційних технологій у галузі переробки РАВ стимулюватиме наукові дослідження, створить нові робочі місця та сприятиме економічному зростанню.

Рис. 1. Застосування стратегії Game Changer до вирішення проблеми радіоактивних відходів



Отже, застосування стратегії Game Changer дозволить завдяки синергії інноваційних технологій та їх широкому впровадженню мінімізувати негативний вплив РАВ на довкілля, зменшити обсяги утворення РАВ, підвищити безпеку їх зберігання та перероблення, а також допоможе ефективніше вилучати з відходів цінні компоненти (рис. 1).

В установах НАН України є значний науково-технічний потенціал, інноваційні напрацювання, а також накопичено досвід щодо вирішення зазначених вище завдань. У період повоєнного відновлення України та стійкого розвитку економіки розроблення й впровадження комплексного методу повної утилізації РАВ з вилученням цінних матеріалів може стати тією проривною технологією, яка змінить правила гри і закладе фундамент подальшого інноваційного розвитку багатьох наукових напрямів.

У Державній установі «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» є багаторічні напрацювання з екологічного моніторингу відвалів уранового виробництва, проведення наукових експертиз усіх етапів комплексного перероблення уранової сировини від

видобутку до захоронення РАВ. Запропоновані нами технічні рішення дозволяють вилучати з цих відходів цінні матеріали, такі як уран, рідкісноземельні елементи, а решту переробляти на екологічно чистий, так званий геополімерний, бетон.

Разом з іншими установами Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України, а також у тісній співпраці з Національною комісією з радіаційного захисту населення України ми відпрацювали інноваційний комплексний підхід до вирішення проблеми перероблення й утилізації РАВ, який складається з кількох етапів (рис. 2):

- 1) обстеження та моніторинг хвостосховищ;
- 2) застосування імпульсної електрогідророзрядної технології диспергування матеріалів;
- 3) використання технології очищення рідких РАВ;
- 4) застосування технології отримання геополімерного бетону;
- 5) забезпечення системи відкритої архітектури для впровадження інших інноваційних технологій.

Обстеження і моніторинг відвалів та хвостосховищ уранового виробництва. Ми про-

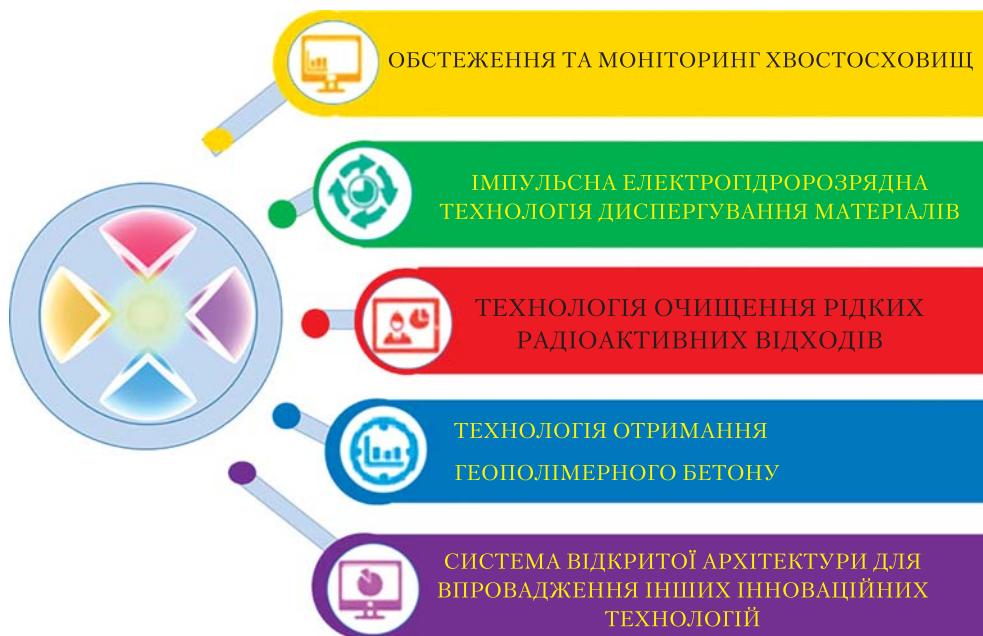


Рис. 2. Інноваційний комплексний підхід до вирішення проблеми перероблення й утилізації радіоактивних відходів

вели сотні експедиційних досліджень відвалів уранових шахт і на основі отриманих результатів створили кілька систем та комплексів, призначених для проведення радіаційного моніторингу й контролю об'єктів ядерно-паливного циклу, а саме:

1) GR-Smart — експертна система радіаційного моніторингу на базі безпілотного літального апарата, яка дає можливість у режимі реального часу проводити огляд та дистанційний аналіз ізотопного складу хвостосховищ уранових рудників, приблизно оцінювати запаси уранової сировини у хвостосховищах для її подальшого вилучення. Тобто ця система може забезпечити концептуальне підґрунтя для переведення скупчень відходів уранового виробництва до категорії техногенних родовищ;

2) R-Navigator — система реагування на ядерні аварії та терористичні загрози, реалізована також на базі безпілотного літального апарата;

3) система Norma-R для контролю за станом низькорадіоактивних відходів;

4) Food Light — експрес-система аналізу радіонуклідного складу в природних об'єктах;

5) Vector — портативна робоча станція для комплексного радіаційного контролю навколишнього середовища;

6) Scrinner-5M — автоматизований комплекс для експрес-оцінки наявності радіоактивних джерел в організмі.

Імпульсна електрогідророзрядна технологія диспергування радіоактивних відходів. Традиційний спосіб перероблення відходів ґрунтується на подрібненні матеріалу стандартним механічним методом, тобто в млинах різних конструкцій. Однак цей процес недешевий: на 1 т подрібненої руди витрачається від 50 до 250 кВт електроенергії.

Разом з іншими науковими установами ми розробили і застосували електрогідророзрядну імпульсну технологію, яка дозволяє в рідинному середовищі дуже економічно та ефективно подрібнювати руду до мікрочастинок з подальшою їх сепарацією. У процесі електрогідродинамічної магніто-імпульсної дезінтеграції руди руйнація відбувається не у випадкових напрямках стискальних зусиль, а переважно по межах мінеральних зерен завдяки дії зсувних і розтягувальних зусиль.

Відсутність тіл, що мелють, та низькі енергетичні витрати зумовлюють не лише екологічну прийнятність запропонованого способу підготовки мінеральної сировини для вилучення цінних матеріалів, а й його високу економіч-

ність та результативність — ця технологія споживає від 2 до 10 разів менше електроенергії, ніж традиційний механічний спосіб подрібнення.

Було також розроблено науково-технологічні засади створення мобільної промислової установки, яку можна встановлювати прямо на майданчику, де зберігаються відходи, а в інституті діє її лабораторний зразок.

Технологія очищення рідких РАВ. У процесі подрібнення відходів утворюються певні обсяги техногенно забрудненої радіоактивної води, яку потрібно очищувати в технологічному процесі. Для вирішення цієї проблеми у співпраці з Інститутом газу НАН України та деякими іншими установами Академії ми розробили універсальну технологію очищення рідких радіоактивних відходів «Плазма-Сорб». Ця технологія ґрунтується на використанні нових підходів до отримання об'ємної низькотемпературної плазми, яка генерується в рідких РАВ з одночасним синтезом наносорбентів, що мають високу ефективність сорбції цезію, стронцію, Європію, Америцію та інших радіонуклідів. Тобто за допомогою плазмохімічного очищення можна вилучати з води радіоактивні відходи і потім знову повертати цю воду в технологічний процес.

На сьогодні зазвичай використовують один із традиційних методів захоронення рідких радіоактивних відходів (РРВ) — їх цементування, коли рідкі радіоактивні відходи змішують з цементом. При цьому з 1 т техногенно забрудненої води утворюються кілька тонн бетону, тобто замість зменшення обсягів радіоактивних відходів ми їх, навпаки, збільшуємо. А в разі застосування нашої технології очищення з 1 т РРВ ми отримаємо у 100—200 разів менше відходів, для довгострокового екологічно безпечного захоронення яких потрібні значно менші об'єми спеціальних сховищ.

Проведені експериментальні дослідження на реальних РРВ з об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС у натурних умовах показали високу ефективність (99 %) розробленого нами багатоступеневого методу їх очищення. Потім технологію було відпрацьовано на багатьох ін-

ших ядерних об'єктах: різні модифікації наших плазмохімічних установок було апробовано в Японії (м. Фукусіма), Казахстані (EL Invest, м. Астана), Великій Британії (ANAMAD, Sussex Innovation Centre) та в деяких інших країнах у рамках міжнародних проєктів. На сьогодні технологія очищення рідких радіоактивних відходів «Плазма-Сорб» проходить тестування на Південноукраїнській АЕС.

Інша наша розробка — універсальна термохімічна кавітаційна технологія перероблення твердих РАВ, яка поєднує три інноваційні технологічні рішення: квазістаціонарну мікропухирчасту плазму, акустичний вихор (ефект торнадо) та гідродинамічний кавітаційний процес. Синтез нанодисперсій та генерація окисників безпосередньо в зоні обробки рідини дають змогу використовувати в процесі окиснення не лише озон, а й більш активні короткоіснуючі частинки, а також значно підвищити ефективність обробки і знизити вартість процесів очищення. Завдяки модульному комплектуванню таких установок можна легко варіювати їхню продуктивність і розміщувати їх на різноманітних промислових майданчиках.

Ця технологія вже достатньо відпрацьована і підготовлена для випробувань на реальних радіоактивних відходах об'єктів ядерно-паливного циклу, що й буде нашим наступним кроком.

Технологія отримання геополімерного бетону. Інноваційну технологію синтезу геополімерного бетону використовують для вирішення двох основних завдань.

1) Компактування суміші з високоактивним радіоактивним концентратом для довгострокового екологічно безпечного захоронення і подальшого тривалого зберігання у спецсховищах пунктів зберігання радіоактивних відходів. Геополімерний бетон має специфічні характеристики: з часом він ще більше твердіє, в нього відсутній зворотний процес десорбції, він має високу міцність на стиск, високу стійкість до вигину тощо. Тому геополімерний бетон якнайкраще придатний для тривалого зберігання РАВ.

2) Вироблення з використанням геополімерного бетону спеціальної суміші, яка складаєть-

ся з пустої породи та відходів комбінатів, для кондиціонування та закачування у шахтні порожнини з метою підвищення їхньої геодинамічної стійкості.

Звісно, що бетони на основі такого цементу матимуть відмінні (високотехнологічні) технічні характеристики. Пуста порода після видобутку урану має алюмосилікатну складову — альбіт, польовий шпат із включенням слюд, сфену, егірину, карбонатів тощо. Мінералогічний склад пустої породи і геоцементу синергетичний, оскільки в процесі твердіння останнього утворюються сполуки, які є аналогами природних цеолітів і фельдшпатоїдів.

За попередніми даними, міцність при стиску таких бетонів становить від 25 до 36 МПа і з плином часу твердіння має тенденцію до зростання. Такі бетони характеризуються також морозостійкістю до F50 і низькою швидкістю вилугування, яка на 28-му добу твердіння

перебуває в межах від 0 до $4 \cdot 10^{-5}$ г/см² за добу, тобто є на порядки меншою, ніж у бетонів на традиційному портландцементі.

Отже, розроблену нами комплексну технологію повної утилізації радіоактивних відходів із вилученням цінних матеріалів захищено 15 українськими та закордонними патентами. Матеріальна база нашого інституту повністю підготовлена і належним чином сертифікована для того, щоб розпочати роботи зі створення пілотного проєкту з використання комплексної технології перероблення радіоактивних відходів об'єктів ядерно-паливного циклу з метою ремедіації земель та відновлення навколишнього середовища, що безумовно сприятиме досягненню цілей сталого розвитку нашої держави у повоєнний період.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання
підготувала О.О. Мележик*

Yuriy L. Zabulonov

Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8239-8654>

INNOVATIVE APPROACHES TO THE PROCESSING OF RADIOACTIVE WASTE FROM NUCLEAR-FISSION CYCLE FACILITIES IN ORDER TO ACHIEVE THE GOALS OF THE STATE'S SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 5, 2025

The report discusses the participation of the National Academy of Sciences of Ukraine institutions in solving urgent and strategically important scientific and technical tasks for the implementation of innovations to solve environmental problems related to radioactive waste management. It is noted that in the period of post-war reconstruction of Ukraine, the development and implementation of a comprehensive method of complete radioactive waste disposal with the extraction of valuable materials can become a breakthrough technology and the foundation for innovative development of many scientific areas.

Cite this article: Zabulonov Yu.L. Innovative approaches to the processing of radioactive waste from nuclear-fission cycle facilities in order to achieve the goals of the state's sustainable development (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 5, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (4): 47—52. <https://doi.org/10.15407/vism2025.04.047>