

**В. І. Сахно\***

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: [sakhno@kinr.kiev.ua](mailto:sakhno@kinr.kiev.ua)

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ВОДОКОРИСТУВАННЯ

Наводяться матеріали щодо залучення прикладної ядерної і радіаційної фізики для вирішення актуальних проблем сучасності. Обговорюються найбільш гострі проблеми погіршення екології, причини втрати можливостей найбільш продуктивних регіонів України та інших країн. Аналізуються проблеми зменшення органічних ресурсів для харчування людей на Землі та сучасні проблеми їхнього співіснування. Описуються найбільш показові міжнародні та вітчизняні проекти застосування радіації для їхнього вирішення.

*Ключові слова:* водокористування, радіація, радіаційні технології.

### 1. Сучасні актуальні проблеми

Найбільшою сучасною загрозою цивілізації є втрати водних ресурсів. Якщо цей процес не зупинити, уникнути катастрофи неможливо. На

рис. 1 наведено дані зі звітів різних організацій ООН щодо реального дефіциту води на земній кулі та розрахункову динаміку погіршення природного водного балансу в різних регіонах Землі.

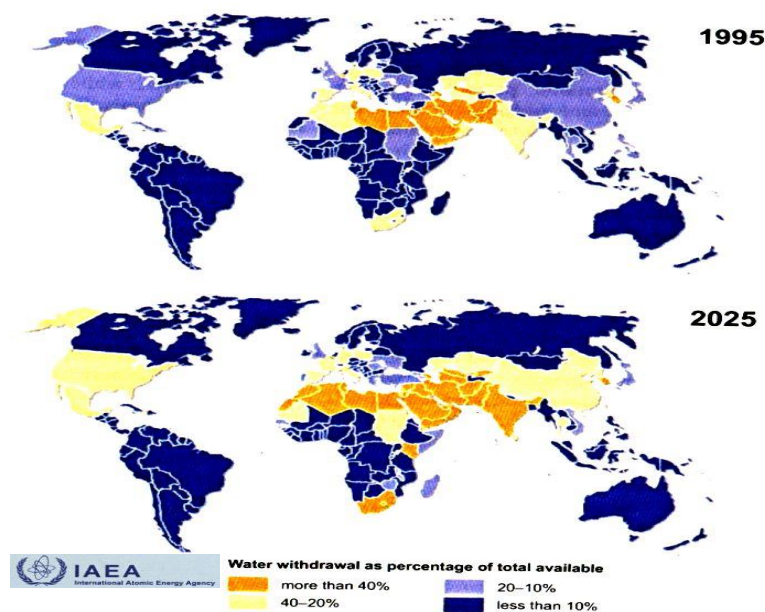


Рис. 1. Дефіцит водних ресурсів на земній кулі та очікувана динаміка [1].

За даними природоохоронних організацій ООН очікується втрата водних ресурсів Землі в найбільш продуктивних частинах земної кулі, де проживає основна маса населення планети.

У 2013 р. на міжнародному водному форумі в Києві була відзначена практично повна втрата промислових можливостей Дніпровського басейну України як у частині зникнення водних ресурсів (гідробіонтів), забруднення води (зростання об'ємів поступання стоків тощо), так і сільського господарства Півдня України (Херсон-

ська, Миколаївська області), які раніше були основними виробниками високобілкових зернових культур [2 - 4]. До 2025 р. прогнозується значне погіршення екологічного стану в басейнах рік північно-східного регіону: збільшення у воді фосфатів, амонійного азоту, сульфатів та інших небажаних речовин порівняно з їхніми гранично допустимими концентраціями (ГДК). За даними Держводагенства України у 2015 р. в поверхневій водні об'єкти басейну тільки однієї річки Рось скинуто майже 40,0 млн м<sup>3</sup> стічних вод, з яких 19,8 млн м<sup>3</sup> без очищення [8].

Ще раніше, при формуванні Національної «морської» Програми України Кабінетом Міністрів України, було констатовано втрату промислового значення Азово-Чорноморського басейну та продуктивності внутрішніх водойм України [3], хоча на початку минулого століття Азовське море було загально визнаним у світі зразком різноманіття рибних ресурсів.

Друга надзвичайно важлива проблема – «парниковий ефект». Вона загрожує зміною клімату на Землі. «Парниковий ефект» виникає через надмірну старанність бізнесу постійно збільшувати випуск продукції за найбільш економічно вигідними дешевими технологіями. Результатом є надходження мільйонів кубометрів випаровувань, токсичних газів, пилових викидів, рідких шкідливих стоків, небезпечних сполук та важких металів. Останні «Киотські» рішення цю проблему вирішити не змогли і призвели до формування нового виду бізнесу – продажу «своїх» квот на токсичні викиди різними країнами. Зросли масштаби антиглобалістських виступів, з'явилась постійна напруженість у світовій спільноті. Виникають численні міжнародні ускладнення й локальні війни, які забирають життя тисяч людей.

Третьою причиною кризи є нестримне зростання чисельності населення планети. За даними експертів ООН (ВООЗ, ФАО) збільшення чисельності населення Землі вище 8 - 9 млрд призведе до виникнення глобальних проблем співіснування. Зростають витрати води на особисту гігієну. Об'єми води для споживання та виробництва харчів прогресивно зменшуються. Органічні ресурси океанів уже практично вичерпано. Є стійка тенденція зменшення видобутку органічної сировини у внутрішніх водоймах розвинутих країн [3]. У даний час усі придатні для землеробства площі використано повністю для сільськогосподарського або промислового виробництва. Енергетичні витрати на приготування їжі зараз майже у 20 разів перевищують енергетичну цінність виготовлених продуктів харчування. Подальше загострення цих проблем призведе до того, що в найближчому часі добування харчів і води стане головною метою виживання в більшості країн світу. І це добре видно по загостренню локальних конфліктів у різних точках земної кулі.

Для виживання людей необхідно випускати додаткові об'єми продукції, як наслідок зростають об'єми відходів. У місцевостях проживання людей через відставання комунальних заходів від темпів зростання численності населення виникають і поширюються нові захворювання, що вимагає додаткового вкладення ресурсів на їхнє подолання.

З аналізу можливостей сучасної ядерної прикладної науки можна зробити висновок, що на даний час оптимальним шляхом залучення радіаційних технологій до виконання першочергових завдань сучасного суспільства є швидке освоєння енергетичного діапазону 0,1 - 0,8 МеВ.

Ці технології зараз надзвичайно перспективні. Вони дозволяють адекватно реагувати на глобальну індустріалізацію, порушення гідрологічних ситуацій у різних регіонах світу та втрату родючості земельних угідь. Останнє стало результатом надмірної «хімізації» економіки в усіх країнах. Пестициди (гербіциди та деякі інші сильнодіючі винаходи колег-хіміків для землеробів), безконтрольне внесення в ґрунти хімічних добрив призвели до втрати величезних земельних ресурсів, забруднення Землі відходами полімерів, що не мають природних механізмів їхнього знешкодження, збільшились викиди шкідливих газів тощо.

Показовим є нагромаджений у світі досвід використання іонізуючих випромінювань низької енергії для захисту довкілля як основної мети і гарантії виживання цивілізації в реаліях прогресуючого збільшення чисельності населення.

## 2. Діючі радіаційні технології та їхні проекти для галузі водокористування

Аналізуючи досягнення радіаційних технологій можна зробити висновок, що виробництво з мінімальними витратами води можливе лише при використанні радіаційних технологій переробки сировини, широкого залучення радіаційних методів знезараження і очистки рідких стоків, промислових відходів та повернення їх у господарський обіг. На початковому етапі – хоча б для технічного використання. Програми повторного використання відпрацьованої води для господарчих потреб уже започатковано в деяких країнах. Хоча чисельність їх поки що незначна, вони показали надзвичайно високі технічні можливості радіаційного знешкодження шкідливої мікрофлори в масах побутових і промислових стоків, радіаційного розкладання поверхнево-активних речовин (головної проблеми усіх сучасних аераційних очисних споруд), видалення органічних і мінеральних включень, радіаційно-хімічної деструкції небезпечних біологічних сполук при масовому виробництві біопрепаратів. На рис. 2 показана одна з таких працюючих установок (Корея).

Уже споруджено ряд таких станцій очистки в різних країнах – Бразилії, США, Японії, Китаї. Зараз цей напрямок є надзвичайно актуальним. Публікуються повідомлення про пошуки нових методів радіаційної обробки стічних вод та техніки для їхньої реалізації.

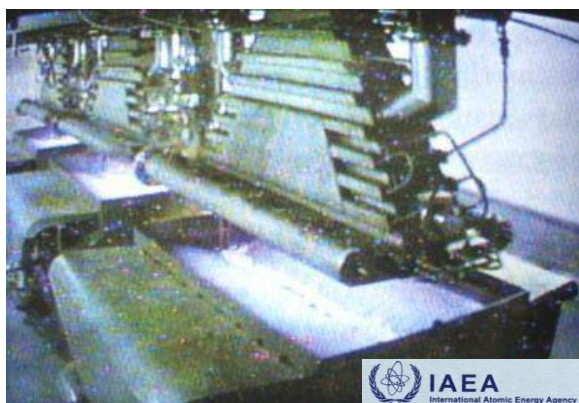


Рис. 2. Радіаційне знешкодження рідких відходів текстильного комбінату.

Українська наука також робить свій внесок у вирішення цієї актуальної проблеми. Наприклад, такі перспективні розробки виконано в секторі радіаційних технологій ІЯД НАН України. На рис. 3 наведено принципову схему оригінальної методики знезараження забруднених органікою і сильно інфікованих рідких стоків [4].

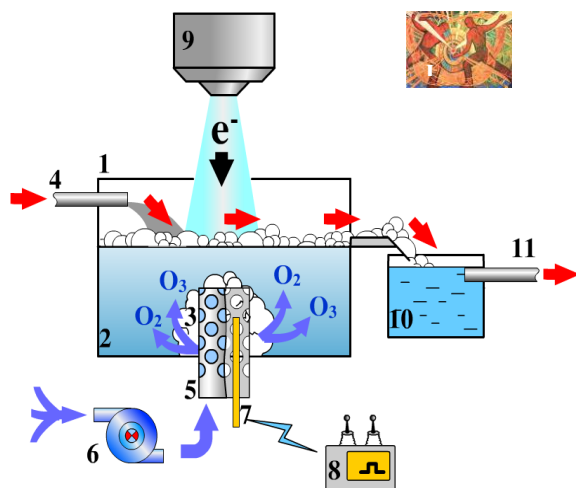


Рис. 3. Перспективна розробка ІЯД НАН України методу електрофізичного знешкодження рідких промислових та комунальних відходів. Резервуар обробки: 1 - резервуар для інфікованої рідини; 2 - інфікована рідина; 3 - область електроударної обробки; 4 - вхідна магістраль; 5 - електроактиватор; 6 - компресор; 7 - електрод; 8 - генератор імпульсів; 9 - прискорювач електронів 0,4 МеВ; 10 - прийомний резервуар; 11 - вихідна магістраль.

Наведена на рис. 3 схема реалізує двоступеневий метод знезараження інфікованих стоків із тубдиспансерів, інфекційних відділень лікарень, комунальних та промислових стоків. Така методика забезпечує практично повне знищення мікрофлори, деструкцію складних органічних включень у прості сполуки та їхню коагуляцію. Отримана рідина буде придатна для повторного використання, а відстої – як органічна сировина для подальшої переробки.

Така комбінована технологія дозволяє створювати малогабаритну і дешеву радіаційну техніку для малих підприємств, районних лікарень та інших невеликих закладів. Установа при потужності обробки 20 - 24 т відходів на добу буде потребувати не більше 12 м<sup>2</sup> технологічних приміщень і споживати 5 кВт електричної енергії.

Слід зазначити, що радіаційно очищені стоки є надзвичайно багатим компостом для підвищення урожайності сільськогосподарських культур. І це вже почало поширюватися в деяких країнах як ефективний спосіб повертання відпрацьованої води і відходів до господарчого обігу, наприклад для удобрення ґрунту. Уже створено спеціалізовані радіаційні установки, орієнтовані на дезинфекцію відстоїв комунальних стоків. Використання стокових мас виявилось надзвичайно прибутковим напрямком отримання природних органічних добрив високої якості (не хімічно синтезованих!). Ефективність повторного використання радіаційно оброблених відходів видно на фото рис. 4.

З фото видно, що стебла пшениці, политі знезараженою електронами стічною водою, більш сильні, мають здоровий вигляд. На практиці це забезпечує різке (майже на 40 %) збільшення врожайності і високу стійкість рослин до захворювань. Сьогодні найбільш прогресивними в цьому напрямку є Ізраїль та Індія, де проблеми нестачі води для сільського господарства є особливо гострими. Тут знезаражені рідини широко використовуються для поливу зернових, мандаринів, лимонів та інших плодкових дерев.



Рис. 4. Сходи пшениці, политі звичайною водою (зліва) та стічними водами після радіаційного знезараження (справа).

У цих країнах проведено ґрунтовні дослідження і створено науково-технічні основи розробки технологічних схем знезараження, оптимальних для будь-якого типу комунальних стоків.

Радіаційні установки, здатні переробляти до



Рис. 5. Рекультивация пустелі опроміненими комунальними відстоями (Ізраїль).

700 т відстоїв щоденно, розроблялись і в США (Бостон). Слід звернути увагу, що таких об'ємів досить для рекультивации значних площ земельних угідь у пустелях (рис. 5) чи облаштування на них садових плантацій (рис. 6).



Рис. 6. Садові плантації, створені на рекультивованих ділянках, з використанням комунальних стоків після радіаційної стерилізації (Індія).

Наведена вище інформація МАГАТЕ [1] є аргументом на користь розробки радіаційної технології для рекультивации земельних угідь у посушливих південних районах України з метою відновлення продуктивності сільського господарства на Миколаївщині та Херсонщині.

Перспективність цього напрямку забезпечується беззаперечними успіхами виробників електронних прискорювачів. Поточний стан і світові тенденції розвитку радіаційних технологій було опубліковано в матеріалах доповіді заступника директора МАГАТЕ доктора С. Мачі [5] (рис. 7 і 8).

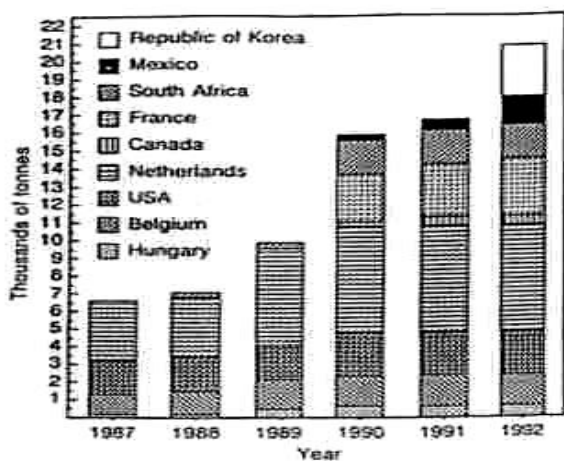


Рис. 7. Динаміка зростання обсягів використання радіаційних технологій у різних країнах.

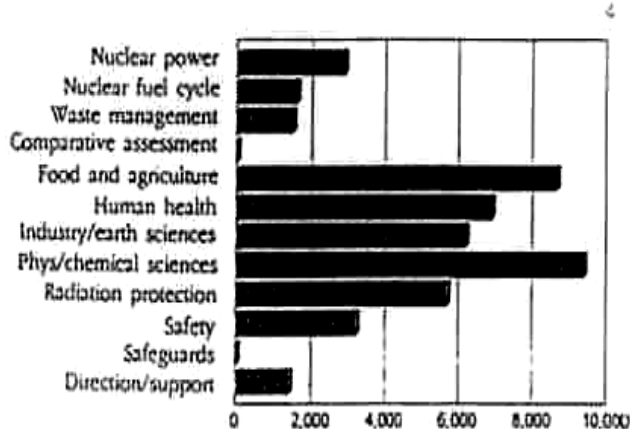


Рис. 8. Співвідношення застосування радіаційних технологій у різних галузях.

Його прогнози виявились правильними. Уже до 2010 р. було створено низку принципово нових конструкцій радіаційної техніки для промислового використання. Нове покоління прискорювачів для радіаційних технологій має високу потужність. Найбільш крупні установки забезпечують потужності пучка близькі до 1 МВт [1]. А такі установки здатні здійснити революційний переворот у технологіях знезараження та повторного використання рідких відходів. Їхнє застосування різко зменшує собівартість обробки. Акцент у таких проектах переноситься з радіаційної техніки на більш досконалі технології та технологічні засоби для переробки опромінених стоків.

Нова потужна електрофізична техніка для вирішення вищенаведених проблем розробляється в різних країнах. Наприклад, в Японії створено прискорювач електронів 0,8 MeV EPS-800-375 з потужністю пучка 300 кВт, у США освоєно прискорювач з потужністю пучка 250 кВт, у Франції вже до 2004 р. створено унікальний прискорювач DC на енергію до 5 MeV при струмів пучка електронів 200 mA (1000 кВт). У Росії для промислових радіаційних технологій створено високо-рентабельний електронний прискорювач ELV-12 на енергію до 1 MeV з потужністю пучка 400 кВт (рис. 9 і 10) [9, 10].

Для довідки: на ринку вартість прискорювача даного діапазону енергій з потужністю пучка 20 кВт становить  $2,5 \cdot 10^4$  \$/кВт, а вартість при-

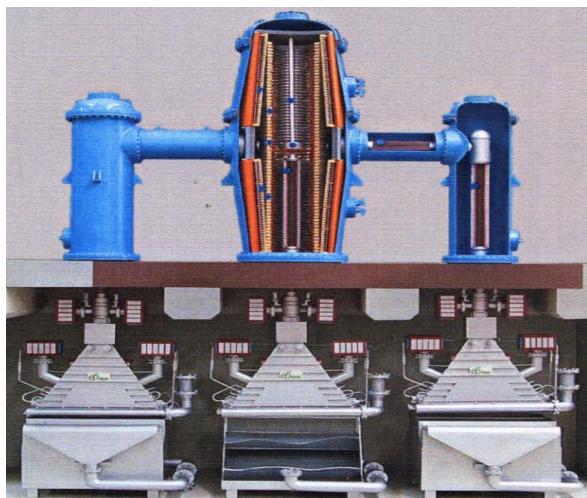


Рис. 9. Сучасний надпотужний прискорювач електронів.

У наукових установах різних країн проводяться масштабні дослідження і розробки технологічних процесів, які найбільшою мірою використали можливості нового покоління надпотужних прискорювачів електронів [11 - 13]. Дослідження у провідних вітчизняних наукових закладах спрямовані на пошуки оптимальних для економіки України методів і технологічних схем

скорювача з потужністю пучка 400 кВт – усього  $0,5 \cdot 10^4$  \$/кВт. Це забезпечує успіх радіаційних технологій у перерахованих напрямках.



Рис. 10. Монтаж в ІЯД НАН України прискорювача 0,4 МеВ і потужністю пучка 20 кВт.

знезараження води, а також відповідної технічної бази для їхнього здійснення [14]. В Україні в ХФТІ НАН України в кооперації з провідними зарубіжними науково-дослідними організаціями розроблено оригінальну ізотопну техніку для радіаційних технологій, зокрема зі знезараження інфікованих рідин (рис. 11) [15, 16].

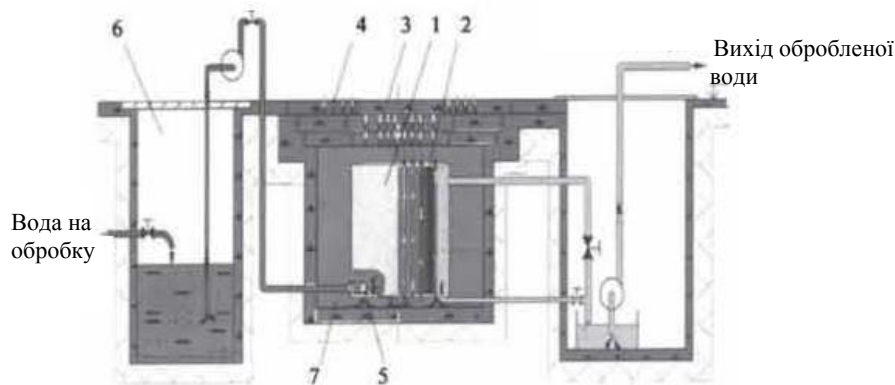


Рис. 11. Схема модуля гамма-установки ХФТІ НАН України на основі радіонуклідів Європію для пікохвильової обробки стічних вод: 1 – реакційна камера, 2 – опромінювач, 3 – захисні плити, 4 – канали із захисними елементами, 5 – гідроакустичний пристрій, 6 – резервуар інфікованої рідини, 7 – камера опромінювання.

Такий прискорювач надасть фахівцям ІЯД НАН України можливість здійснювати перспективні розробки новітніх технологій знешкодження шкідливих викидів та промислових відходів, інфікованих біомас, нових полімерних матеріалів, медичних засобів та інших прогресивних технологій.

Опираючись на досвід впровадження радіаційних технологій, можна стверджувати, що плани перспективних технологічних досліджень і розробки в ІЯД НАН України доцільно розроб-

ляти згідно з тенденціями вирішення актуальних проблем сучасного суспільства, у першу чергу для вирішення проблем ефективного водокористування у вітчизняній економіці за умови відповідного запиту від спільноти в Україні.

### 3. Проблеми впровадження радіаційних технологій

Аналіз світового досвіду впровадження та експлуатації радіаційних технологій у системи водокористування дав, на перший погляд, пара-

доксальний результат. Виявились поодинокі випадки того, що через певний період успішної експлуатації з високими екологічними показниками очисні радіаційні установки виводяться з експлуатації. Наприклад, радіаційна система знезараження стоків хімкомбінату в Республіці Корея недавно була зупинена. Корейці перенесли свій завод у Китай, де знезараження стоків не обов'язкове. У Польщі припинено експлуатацію високоефективної радіаційної установки з очистки викидів теплової електростанції та випуску з них сільськогосподарських добрив. Як тільки з МАГАТЕ припинили виділяти окреме фінансування на її створення та експлуатацію, власники електростанції не заважали перекидати експлуатаційні витрати очистки на собівартість продукції, а вважали за вигідніше відмовитися від очистки газових викидів. А стоки та інші шкідливі викиди продовжують скидати в навколишнє середовище, як і 30 років тому.

Після безуспішної спроби міжнародної спільноти налагодити контроль за негативним впливом промислового виробництва на природу стали зрозумілі витoki такої тенденції. Вони полягають в особливостях обороту капіталу за ринкової економіки. Бажання постійного зростання капіталізації призводить до того, що бізнес іде на спрощення технологічних процесів і скорочення штатів заради фінансової вигоди. Від участі в Кіотському проєкті відмовились найбільш еко-

номічно розвинуті країни. Така відмова від екологічних заходів заради нарощування капіталу відбувається в усьому світі. Бізнес завжди віддасть перевагу екологічно небезпечним технологіям, якщо це обіцяє йому зростання капіталу.

За такої ситуації завданням науки є пошуки шляхів максимального зниження собівартості радіаційної обробки стоків та одиначної вартості технічних засобів. А такі дослідження в ІЯД НАН України можуть бути розгорнуті після вводу в експлуатацію прискорювача електронів низької енергії з великою потужністю пучка. Важливо також проведення широкомасштабних досліджень впливу сучасного інтенсивного виробництва на природу та на здоров'я людей.

#### 4. Висновки

Обґрунтовано актуальність застосування радіаційних технологій до вирішення проблем водокористування. Установлено позитивну динаміку розвитку цих радіаційних технологій у світі. Розглянуто світовий досвід впровадження радіаційних технологій у галузь водокористування. Визначено найбільш значимі проєкти систем радіаційного знезараження в різних країнах і техніки для їхнього здійснення. Обґрунтовано, що плани перспективних технологічних досліджень в ІЯД НАН України доцільно розробляти з урахуванням світових реалій вирішення актуальних проблем сучасного суспільства.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. [Radiation Processing: Environmental Applications \(Vienna, IAEA, 2007\) 71 p.](#)
2. Інтегроване управління водними ресурсами: Наук. зб. Відп. ред. В. І. Щербак (К.: ДІА, 2013) 640 с.
3. Аналітична довідка про підсумки роботи рибогосподарського комплексу України за 2010 рік (К., Державне агентство рибного господарства України, 2011).
4. В.В. Шлапацкая и др. Проект технологических линий электронно-лучевого обеззараживания стоков инфекционных отделений больниц и тубдиспансеров. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования* 4(35) (1999) 102.
5. S. Machi. *Application of Radiation and Isotope Technology for Industry and Environmental Protection. Report of a working group. Technical University of Bucharest, Romania (Bucharest, 1995) 15 p.*
6. В.І. Сахно та ін. Дослідження та розробка прискорювача 0,5 МеВ для експериментального радіаційного комплексу. У кн.: *Тези доп. XXI Щорічної конференції Ін-ту ядерних дослідж. НАН України, Київ, Україна, 27 - 31 січня 2014 р. (Київ, 2014) с. 121.*
7. Т.В. Ковалінська. Новий метод знезараження інфікованих стоків. *Інтегроване управління водними ресурсами* 2 (2014) 357.
8. Аналітична довідка про підсумки роботи рибогосподарського комплексу України за 2015 рік. (К.: Державне агентство рибного господарства України, 2016).
9. M.H. Sampa. Ongoing research in Brazil using electron beam liquid waste treatment. In: *Status of Industrial Scale Radiation Treatment of Wastewater and its Future. In: Proc. Consultants Meeting, Daejon, 13 - 16 October 2003. IAEA-TECDOC-1407. (Vienna, IAEA, 2004) p. 29.*
10. Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10 - 14 октября 2005 (СПб.: СПбГУ, 2005) (ООП НИИХ СПбГУ) 447 с.
11. Е.А. Подзорова. Комбинированные радиационные методы очистки воды и сточных вод. Дис. ... д-ра хим. наук (Москва, 2001) 299 с.
12. А.К. Pikaev. Mechanism of radiation purification of polluted water and wastewater. *Water Sci. and Technol.* 44(5) (2002) 131.

13. А.В. Егоркин. Радиационные технологии как универсальное решение. [Материалы портала «Научная Россия». 5 ноября 2014 г.](#)
14. О.М. Черняк, В.В. Моргунов, Р.М. Триш. Застосування методу Монте-Карло для визначення технологічних параметрів радіаційної обробки прискореними електронами. [Машинобудування 20 \(2017\) 162.](#)
15. С.В. Дюльдя, М.И. Братченко, М.А. Скоробогатов. Радионуклиды Еврория как источники излучения для гамма-радиационных технологий: моделирование распределения поглощенной дозы в гомогенных средах. [Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение 3\(85\) \(2004\) 128.](#)
16. В.И. Ткаченко и др. Установка пиковолновой обработки для обеззараживания сточных вод бактериологически опасных объектов (Харьков, ННЦ ХФТИ, 2014).

**В. И. Сахно\***

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

\*Ответственный автор: sakhno@kinr.kiev.ua

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

Приведены материалы об эффективности привлечения прикладной ядерной и радиационной физики к решению актуальных проблем современности. Обсуждаются наиболее острые проблемы ухудшения экологии, причины потери возможностей наиболее продуктивных регионов Украины и других стран. Анализируются проблемы уменьшения органических ресурсов для питания людей на Земле и современные проблемы их сосуществования. Описаны наиболее показательные международные и отечественные проекты использования радиации для их решения.

*Ключевые слова:* водопользование, радиация, радиационные технологии.

**V. I. Sakhno\***

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: sakhno@kinr.kiev.ua

### **PERSPECTIVES OF APPLYING RADIATION TECHNOLOGIES FOR SOLVING OF WATER USAGE PROBLEM**

Some materials concerning the effectiveness of using applied nuclear and radiation physics for solving urgent problems of contemporaneity are presented. The most acute problems of environmental degradation, the reasons for the loss of opportunities in the most productive regions of Ukraine and other countries are discussed. The problems of reducing organic resources for human nutrition on Earth and the current problems of their coexistence are analyzed. The most important international and domestic projects of using radiation for solving such problems are described.

*Keywords:* water usage, radiation, radiation technologies.

#### REFERENCES

1. [Radiation Processing: Environmental Applications \(Vienna, IAEA, 2007\) 71 p.](#)
2. [Integrated Water Resources Management. Ed. V. I. Shcherbak \(Kyiv: DIA, 2013\) 640 p. \(Ukr\)](#)
3. [Analytical Reference on the Results of the Fisheries Complex of Ukraine 2010 \(K., State Fisheries Agency of Ukraine, 2011\). \(Ukr\)](#)
4. V.V. Shlapatska et al. The project of the technological line of the electronic-beam drains disinfection in the infected hospitals' divisions and tubercular centres. [Problems of Atomic Science and Technology. Sec.: Nuclear Instruments & Methods in Physics Research 4 \(1999\) 102. \(Rus\)](#)
5. S. Machi. Application of Radiation and Isotope Technology for Industry and Environmental Protection. Report of a working group. Technical University of Bucharest, Romania (Bucharest, 1995) 15 p.
6. V.I. Sakhno et al. Research and development of the 0.5 MeV accelerator for the experimental radiation complex. In: [Abstracts of the XXI Annual conf. of the Institute for Nuclear Research, Nat. Ac. Sci. of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 27 - 31 Jan. 2014 \(Kyiv, 2014\) p. 121. \(Ukr\)](#)
7. T.V. Kovalinska. New method of disinfection of infected sewage. [Intehrovane Upravlinnya Vodnymy Resursamy 2 \(2014\) 357. \(Ukr\)](#)

8. Analytical Reference on the Results of the Fisheries Complex of Ukraine 2015 (K., State Fisheries Agency of Ukraine, 2016). (Ukr)
9. M.H. Sampa. Ongoing research in Brazil using electron beam liquid waste treatment. In: Status of Industrial Scale Radiation Treatment of Wastewater and its Future. In: *Proc. Consultants Meeting, Daejeon, 13 - 16 October 2003. IAEA-TECDOC-1407.* (Vienna, IAEA, 2004) p. 29.
10. *Proc. of the reports of the eleventh international meeting on the use of accelerators of charged particles in industry and medicine, St. Petersburg, October 10 - 14, 2005 (St. Petersburg: SPbSU, 2005) (PIC NIIKh St. Petersburg State University) 447 p.* (Rus)
11. E.A. Podzorov. Combined radiation methods of water and wastewater treatment. Thesis of Dr. of Chemical Sciences (Moskva, 2001) 299 p. (Rus)
12. A.K. Pikaev. Mechanism of radiation purification of polluted water and wastewater. *Water Sci. and Technol.* 44(5) (2002) 131.
13. A.V. Egorkin. Radiation technologies as a universal solution. *Materialy portala «Nauchnaya Rossiya».* 5 Nov. 2014. (Rus)
14. O.M. Chernyak, V.V. Morhunov, R.M. Trishch. Application of the Monte Carlo method for determination of technological parameters of radiation treatment by accelerated electrons. *Mashynobuduvannya* 20 (2017) 162. (Ukr)
15. S.V. Dyul'dya, M.I. Bratchenko, M.A. Skorobogatov. Europium radionuclides as sources of radiation for gamma-radiation technologies: Modeling the distribution of the absorbed dose in homogeneous environments. *Problems of Atomic Science and Technology. Sec.: Physics of radiation damage and radiation materials* 3 (2004) 128. (Rus)
16. V.I. Tkachenko et al. Installation for a wave treatment for disinfection of wastewater of bacteriologically dangerous objects (Kharkov, NSC KIPT, 2014) (Rus)

Надійшла 28.09.2018

Received 28.09.2018