

DEACTIVATION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE: WAYS OF SOLUTION

Zabulonov Yu., Melnychenko T., Kadoshnikov V., Kuzenko S., Peer I.

ДЕЗАКТИВАЦІЯ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ: ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ

¹ЗАБУЛОНОВ Ю.,
¹МЕЛЬНИЧЕНКО Т.,
¹КАДОШНИКОВ В.
¹КУЗЕНКО С., ²ПЕЕР І.
¹ДУ «Інститут геохімії
навколишнього
середовища НАМН
України», Київ, Україна
²ТОВ «АЛЬФА АТОМ»,
Київ, Україна

Інтенсивне використання ядерної енергетики попри відчутні та обґрунтовані переваги несе у собі значні екологічні та медичні ризики через можливість витоку радіонуклідів у довкілля внаслідок аварій та інших позаштатних ситуацій.

Найбільшою у світі ядерною техногенною катастрофою людства визнана аварія на Чорнобильській АЕС, яка через значні екологічні, гуманітарні та медичні наслідки донині залишається предметом

вивчення та обговорення світовою науковою спільнотою. Наразі добре дослідженими та доведеними є радіологічні та медичні наслідки аварії на Чорнобильській АЕС [1]:

□ підвищення захворюваності та смертності учасників ліквідації наслідків аварії (ЛНА) від серцево-судинних захворювань;

□ висока частота цереброваскулярних захворювань та когнітивних порушень в учасників ЛНА;

□ підвищення частоти радіаційних катаракт та су-

ДЕЗАКТИВАЦІЯ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ: ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ

¹Забулонов Ю., ¹Мельниченко Т.,
¹Кадошников В., ¹Кузенко С., ²Пеер І.

¹ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», Київ, Україна

²ТОВ «АЛЬФА АТОМ», Київ, Україна

Мета дослідження: на підставі інформаційного аналізу щодо сучасних підходів і експериментальних досліджень розробити ефективні методи дезактивації радіоактивно забруднених вод Чорнобильської зони відчуження.

Матеріали та методи дослідження.

Об'єктом нашого дослідження були рідкі радіоактивні відходи, що зберігаються у відстійниках одного з пунктів дезактивації обладнання та транспортних засобів (ПуСО) – об'єкта «Діброва». Застосовано сучасні методи досліджень – скануюча електронна мікроскопія, рентгенівська дифрактометрія, лазерна седиментографія. Масову частку цезію, стронцію, кобальту, марганцю визначали атомно-абсорбційним методом з використанням атомно-абсорбційного спектрофотометра моделі AA-8500 (Nippon Jarrell Ash Co Ltd, Japan).

Результати. Показано ефективність запропонованих сорбентів на основі модифікованих фероціанідами нікелю-калію залізооксидних мікро- та нанотрубок і наночастинок гідроксиду заліза (III), розмір яких становить переважно 1-100 мкм. Вибір алгоритму проведення дезактивації залежить від складу рідких радіоактивних відходів, які підлягають очищенню. Для підвищення ступеня вилучення стронцію зі збереженням високої ефективності вилучення цезію і перехідних металів доцільно застосувати попередню плазмохімічну обробку з подальшим використанням сорбентів на основі модифікованих фероціанідами оксидів/гідроксидів заліза.

Висновки. Показано можливість та доцільність застосування запропонованого методу для дезактивації рідких радіоактивних відходів, накопичених у Чорнобильській зоні відчуження, та для поточного контролю стану місць зберігання накопичених РРВ і радіаційного моніторингу.

Ключові слова: рідкі радіоактивні відходи, Чорнобильська зона відчуження, сорбційний метод, фероціаніди, оксиди/гідроксиди заліза, медичні наслідки аварії на ЧАЕС.

© Забулонов Ю., Мельниченко Т., Кадошников В., Кузенко С., Пеер І. СТАТТЯ, 2023.

динної патології ока;

□ підвищення захворюваності на непухлинні захворювання щитоподібної залози;

□ порушення психічного здоров'я у дітей, які були опромінені *in utero*;

□ захворюваність на усі форми раку в учасників ЛНА на Чорнобильській АЕС перевищує національний рівень;

□ істотне перевищення очікуваного рівня захворюваності на рак щитоподібної залози в учасників ЛНА у 4,4 рази, евакуйованих осіб – у 4,0 рази, мешканців забруднених територій – в 1,3 рази;

□ захворюваність на лейкемії та лімфоми в учасників ЛНА в 1,5 рази вища за національний рівень, в евакуйованих осіб – в 1,4 рази;

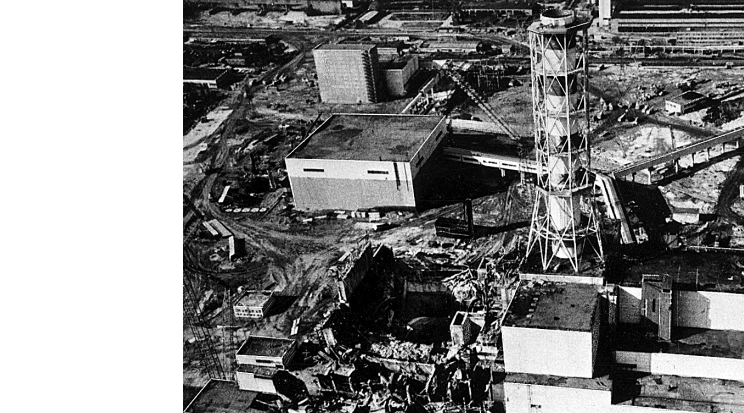
□ захворюваність жінок-учасниць ЛНА на рак молочної залози в 1,6 рази вища за очікуваний рівень;

□ встановлено більш високий рівень захворюваності населення територій України, що зазнали більшого забруднення ¹³¹I та мали більш високі середньообласні дози опромінення щитоподібної залози (понад 35 мЗв) порівняно з показниками решти областей (менше 35 мЗв).

Нині найбільш помітним медичним наслідком аварії на ЧАЕС вважається значне зростання захворюваності на рак щитоподібної залози серед дітей та підлітків [2].

Після аварії на Чорнобильській атомній станції минуло 37 років. Незважаючи на такий тривалий проміжок часу донині зберігається негативний вплив іонізуючого випромінювання на довкілля та здоров'я населення.

Наразі суттєву потенційну загрозу становлять рідкі радіаційні відходи



ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЯ

(РРВ), накопичувані у процесі експлуатації АЕС, у тому числі і в аварійних ситуаціях [3]. РРВ Чорнобильської зони відчуження зберігаються у спеціальних ємностях-накопичувачах, які за тривалий період через біодеструкцію поступово втрачають герметичність, а радіонукліди мігрують у довкілля. За даними ДСП ЧАЕС, у сховищах накопичено 20133 м³ рідких радіоактивних відходів [4].

Слід зазначити, що останнім часом суттєво змінився водний баланс та характер розподілу радіонуклідів на території Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ). Напрямок руху ґрунтових вод у районі об'єкта «Укриття» за останні роки змінився з північного на північно-східний у бік заплави річки Прип'ять та залишкових озер на місці розташування колишнього водоймища-охолоджувача. При цьому швидкість руху підземних вод зросла до 40 м/рік і, відповідно, зросли швидкості міграції радіонуклідів з підземними водами, які розвантажуються у річку Прип'ять та залишкові озера водоймища-охолоджувача, тим самим додаючи свою частку до радіоактивного забруднення поверхневих вод – джерел питного водопостачання населення України [5].

Триваюча в Україні війна створює значні загрози фізичного розповсюдження

накопичених радіоактивних відходів через високий ризик руйнування об'єктів їх зберігання та переробки внаслідок бойових дій, диверсійну та терористичну діяльність, незаконне вилучення тощо. Наслідки такого розповсюдження є важко прогнозованими, виток значних кількостей РРВ у довкілля може забруднити значні території та водойми, загрожувати здоров'ю і безпеці населення України та інших прилеглих держав.

Як впливає з викладеного вище, існує нагальна необхідність якнайшвидшої дезактивації значних об'ємів радіоактивних вод. Передбачається, що очищену воду можна використовувати для потреб ЧЗВ, а сконцентрований радіоактивний осад середньої активності, компактований методом цементування або склування, направляти до сховищ тривалого зберігання радіоактивних відходів.

Мета роботи. На підставі інформаційного аналізу сучасних підходів і експериментальних досліджень розробити ефективні методи дезактивації радіоактивно забруднених вод Чорнобильської зони відчуження.

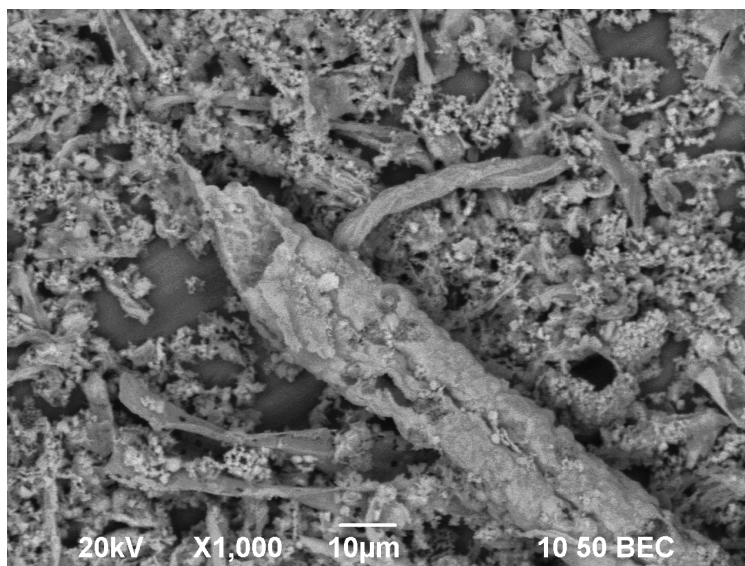
Матеріали і методи. Об'єктом нашого дослідження були рідкі радіоактивні відходи, що зберігаються у відстійниках одного з пунктів дезактивації обладнання та транспортних засобів (ПуСО) –

об'єкта «Діброва» (належить до II радіаційно-режимної зони). Радіохімічний аналіз забруднених вод показав, що основними дозовизначальними радіонуклідами є цезій-134, цезій-137, стронцій-90 та кобальт-60, які

внаслідок їхньої високої міграційної здатності потрапляють до ґрунтових та підземних вод, забруднюючи не лише ЧЗВ, але й прилеглі території. Міграція цезію мало залежить від кислотності дренажних вод, що зумовлено

Рисунок 1

СЕМ-зображення залізооксидних мікро- та нанотрубок



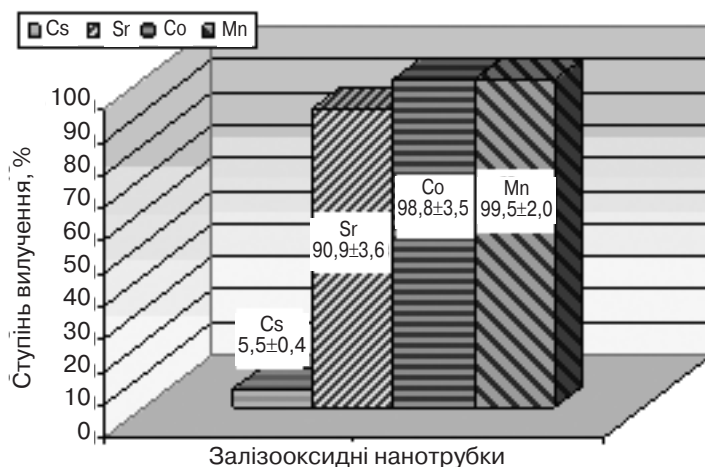
Таблиця 1

Гранулометричний склад дисперсії залізооксидних мікро- і нанотрубок (%)

Фракції, мкм	<0,1	0,1-1	1-10	10-100	>100
Залізооксидні нанотрубки	0,05	3,96	47,55	48,34	0,10

Рисунок 2

Ступінь вилучення (%) імітантів радіонуклідів (іонів цезію, стронцію, кобальту, марганцю) залізооксидними нанотрубками із розчину-імітанта



природою іона. Водночас міграція стронцію значною мірою залежить від pH [5].

Окрім зазначених радіонуклідів, вода, яка підлягає очищенню, містить катіони важких металів (кобальт, марганець, мідь) та аніони, переважно нітрати і борати, а також органічні речовини у вигляді гуматів.

На основі отриманих даних про склад вод, що підлягають очищенню, розроблено і виготовлено імітант – водний розчин, який містив стабільні ізотопи цезію – 10 мг/дм³, стронцію – 34 мг/дм³, кобальту – 8,0 мг/дм³, міді – 12 мг/дм³, марганцю – 60 мг/дм³ і заліза – 140 мг/дм³, витяжки торфу – 20 г/дм³, борної кислоти – 180 мг/дм³, гідроксиду натрію – 156 мг/дм³, гідроксиду калію – 14 мг/дм³, азотної кислоти – 60 мг/дм³. pH розчину ~ 6. Для приготування імітанта використано хімічно чисті реактиви, у тому числі азотно-кислі солі цезію, стронцію, кобальту, марганцю, міді, заліза. Як джерело гуматів використано водну витяжку торфу (pH 8-9).

В експериментальних дослідженнях використано сорбенти – нанокомпозит на основі модифікованих фероціанідами залізооксидних мікро- і нанотрубок [6] і нанодисперсію комплексного сорбента на основі модифікованих фероціанідами наночастинок гідроксиду заліза [7]. Обробку розчинів провадили комплексним плазмохімічним способом очищення [8].

Методи дослідження.

Розподіл частинок водних дисперсій за розміром визначали за допомогою лазерного седиментографа Mastersizer 2000 з модулем рідинної дисперсії HydroS (Malvern Instruments Ltd, UK), принцип роботи якого ґрунтується на ла-

DEACTIVATION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE: WAYS OF SOLUTION

¹Zabulonov Yu., ¹Melnychenko T., ¹Kadoshnikov V., ¹Kuzenko S., ²Peer I.

¹State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

¹ALFA ATOM LLC, Kyiv, Ukraine

The purpose of the study: on the basis of information analysis of modern approaches and experimental studies, to develop effective methods of decontamination of radioactively contaminated waters of the Chornobyl Exclusion Zone.

Research materials and methods: The object of our research was liquid radioactive waste stored in the sumps of one of the decontamination points for equipment and vehicles (PuSO) – the «Dibrova» facility. Modern research methods are applied – scanning electron microscopy, X-ray diffractometry, laser sedimentography. The mass fraction of cesium, strontium, cobalt, and manganese was determined by the atomic absorption method using an AA-8500 atomic absorption spectrophotometer (Nippon Jarrell Ash Co Ltd, Japan). The results. The effectiveness of the pro-

posed sorbents based on nickel-potassium ferrocyanide-modified iron oxide micro- and nanotubes and iron (III) hydroxide nanoparticles, the size of which is mainly 1-100 μm, is shown. The choice of decontamination algorithm depends on the composition of liquid radioactive waste to be cleaned. To increase the degree of strontium extraction while maintaining the high efficiency of cesium and transition metal extraction, it is advisable to apply preliminary plasma chemical treatment followed by the use of sorbents based on iron oxides/hydroxides modified by ferrocyanides.

Conclusions: The possibility and expediency of using the proposed method for the decontamination of liquid radioactive waste accumulated in the Chornobyl exclusion zone and for the current control of the condition of the storage sites of accumulated radioactive waste and radiation monitoring are shown.

Keywords: liquid radioactive waste, Chornobyl exclusion zone, sorption method, ferrocyanides, iron oxides/hydroxides, medical consequences of the Chornobyl NPP accident.

зерній дифракції світла.

Для оцінки структури наночастинок застосовували рентгенівську дифрактометрію (рентгенівський дифрактометр ДРОН-3М з використанням монохроматичного Cu-K_α – випромінювання за стандартною методикою).

Топографічні особливості нанокристалів вивчали методом скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) з використанням автоемісійного скануючого електронного мікроскопа JSM-6700F (JEOL, Japan).

Дослідження сорбції проводили у статичних умовах з безперервним перемішуванням протягом 1 години (співвідношення твердої і рідкої фаз – 1 : 10000).

Масову частку цезію, стронцію, кобальту, марганцю у вихідному та очищеному розчинах визначали атомно-абсорбційним методом з викори-

станням атомно-абсорбційного спектрофотометра моделі AA-8500 (Nippon Jarrell Ash Co Ltd, Japan).

На підставі отриманих даних розраховували ступінь вилучення (%) імітантів радіонуклідів (цезію, стронцію, кобальту, марганцю) із розчину.

Лабораторні радіометричні вимірювання проведено на базі Державного спеціалізованого підприємства «Центральне підприємство поводження з радіоактивними відходами» з використанням гамма-радіометра РКГ-05П і лабораторного альфа- та бета-радіометра УМФ-2000.

Результати та обговорення. Загальновідомим методом очищення РРВ є сорбційний, який передбачає видалення радіонуклідів у вигляді твердої фази у результаті адсорбції, іонного обміну, адгезії тощо.

Специфічними сорбентами для видалення радіоцезію є фероціаніди перехідних металів. Для посилення вибіркової сорбції цезію використовують фероціаніди, нанесені на поверхню твердого носія (полімерно-неорганічних, природних і синтетичних сорбентів) [9].

Останнім часом активно розвиваються плазмохімічні методи, які найчастіше використовуються тільки для руйнування органічних речовин, у тому числі гумінових [10].

Для дезактивації радіаційно забруднених вод методом сорбції використовували розроблені нами сорбенти на основі модифікованих фероціанідами нікелю-калію оксидів/гідроксидів заліза [6, 7].

Залізооксидні мікронанотрубки, одержані темплатним методом з колоїдного розчину гідроксиду

заліза (III), що складаються, як встановлено методом рентгенівської дифрактометрії, з оксидів заліза α - і γ -модифікацій, а також частково гідратованого β -FeOOH.

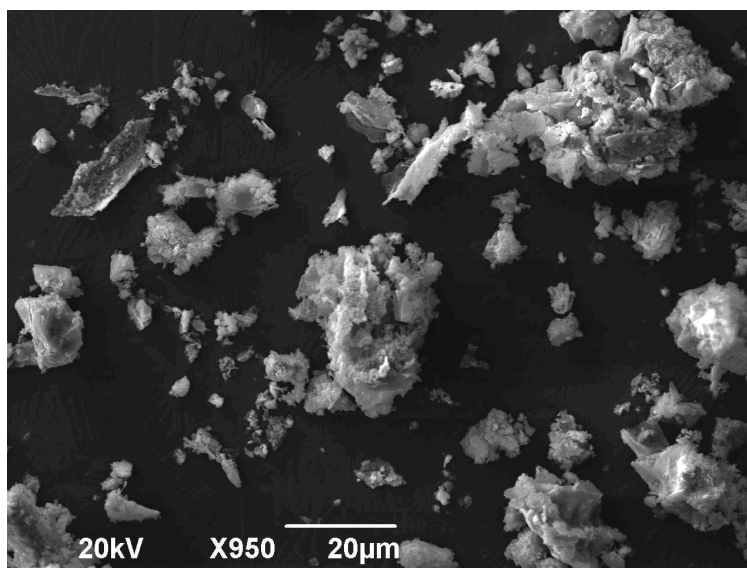
Методом СЕМ встанов-

лено, що зовнішній діаметр залізооксидних мікро- і нанотрубок становить 8-13 мкм, а товщина стінок – 0,5-2 мкм (рис. 1).

За допомогою лазерного седиментографа досліджено дисперсний склад

Рисунок 3

СЕМ-зображення модифікованих залізооксидних мікро- та нанотрубок



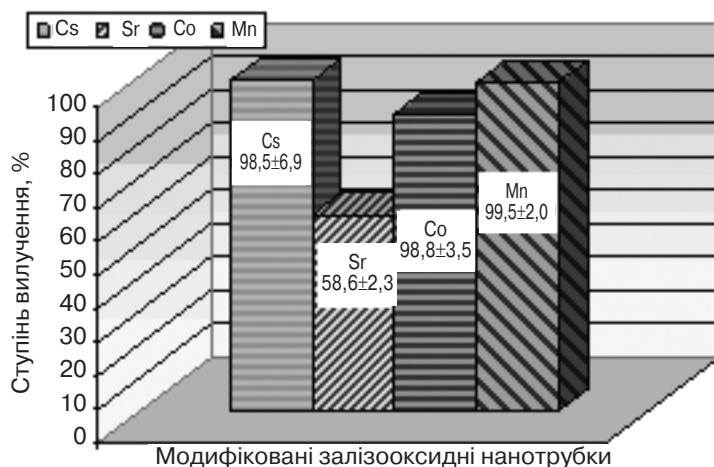
Таблиця 2

Гранулометричний склад дисперсії модифікованих залізооксидних мікро- і нанотрубок (%)

Фракції, мкм	<0,1	0,1-1	1-10	10-100	>100
Модифіковані фероціанідами нікелю-калію залізооксидні нанотрубки	0,05	10,24	44,59	45,12	–

Рисунок 4

Ступінь вилучення (%) імітантів радіонуклідів (іонів цезію, стронцію, кобальту, марганцю) модифікованими залізооксидними нанотрубками із розчину-імітанта



залізооксидних мікро- та нанотрубок (табл. 1).

Як видно з таблиці 1, залізооксидні мікро- і нанотрубки представлені переважно частинками розміром 1-10 мкм і 10-100 мкм.

Результати досліджень сорбційних властивостей залізооксидних мікро- і нанотрубок щодо цезію, стронцію, кобальту, марганцю наведено на рисунку 2.

З отриманих результатів видно, що ступінь вилучення цезію вкрай низький, що зумовлено його хімічною природою, природою сорбата і механізмом сорбції, провідним в якому є іонний обмін. Високий ступінь вилучення перехідних металів і стронцію обумовлений високою спорідненістю зазначених елементів до сорбенту.

Для покращання сорбції цезію поверхню залізооксидних мікро- і нанотрубок модифікували нано- і мікрочастинками фероціанідів нікелю-калію [6].

На рисунку 3 представлено СЕМ-зображення модифікованих фероціанідами нікелю-калію залізооксидних нанотрубок.

На СЕМ-зображенні можна спостерігати поодинокі дрібні кристали, що можуть належати оксидам заліза і фероціанідам нікелю-калію, а також агломерати, утворені мікро- і нанотрубками, з осадженими на їхню поверхню наночастинками фероціанідів.

Дослідження гранулометричного складу показало, що модифікування нанотрубок нано- і мікрочастинками фероціанідів суттєво не вплинуло на дисперсний склад (табл. 2).

Дослідження сорбційних властивостей модифікованих фероціанідами залізооксидних нанотрубок по-

казало, що модифікування дозволило практично повністю вилучити цезій із досліджуваного розчину (рис. 4).

Високий ступінь вилучення цезію пояснюється специфічним механізмом взаємодії іонів цезію з мікро- і нанокристаллами фероціанідів нікелю-калію [11].

Суттєвим недоліком зазначеного способу є доволі складна технологія одержання матриці сорбенту – залізооксидних нанотрубок. Заміна залізооксидних нанотрубок на наночастинки гідроксиду заліза (III) з наступною їх модифікацією фероціанідами перехідних металів [7] дозволяє отримати сорбент, який за сорбційними властивостями щодо цезію дещо поступається нанокompозиту на основі модифікованих фероціанідами залізооксидних нанотрубок (рис. 5). Ступінь вилучення перехідних металів (кобальту та марганцю) досить високий і становить близько 98-99%.

Як видно з рисунка 5, ступінь вилучення стронцію не перевищує 50%, що, вірогідно, пояснюється особливостями сорбції іонів стронцію на аморфних міцелах гідроксиду заліза. Крім того, низький ступінь вилучення стронцію, ймовірно, пов'язаний з високим вмістом у досліджуваному розчині перехідних металів, спорідненість яких до гідроксиду заліза значно вища, ніж іонів стронцію. Разом з тим, спосіб отримання зазначеного сорбенту простіший у виконанні порівняно зі способом отримання модифікованих залізооксидних нанотрубок.

Недоліком усіх сорбційних методів є негативний вплив органічних речовин

на сорбційні процеси. Ефективним способом руйнування органічних речовин у забруднених водах є плазмохімічна обробка [10]. У результаті проходження електричного імпульсу через водний розчин утворюються сильні окисники, які руйнують органічні речовини. Сутність впливу високовольтних розрядів полягає у наступ-

ному: високі енергії імпульсних розрядів у поєднанні з цілим комплексом явищ, які супроводжують електричний розряд у рідині (ударні хвилі, потужні гідропотоки, імпульси електромагнітного випромінювання, явища кавітації і радіолізу) спричиняють руйнування міжмолекулярних і між-атомних зв'язків розчине-

Рисунок 5

Ступінь вилучення (%) імітантів радіонуклідів (іонів цезію, стронцію, кобальту, марганцю) модифікованими наночастинками гідроксиду заліза із розчину-імітанта

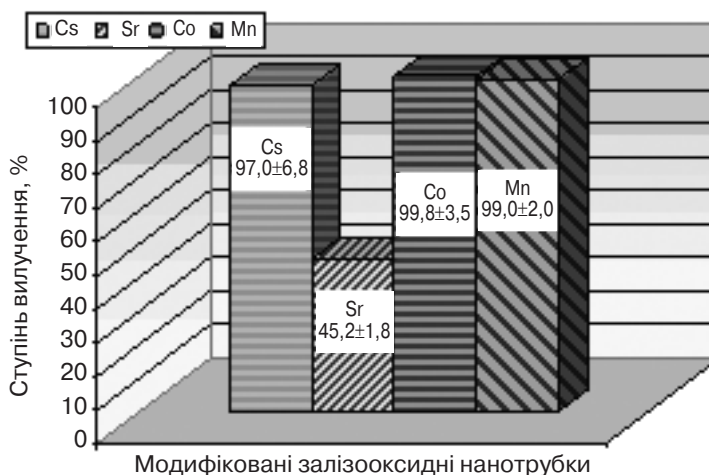
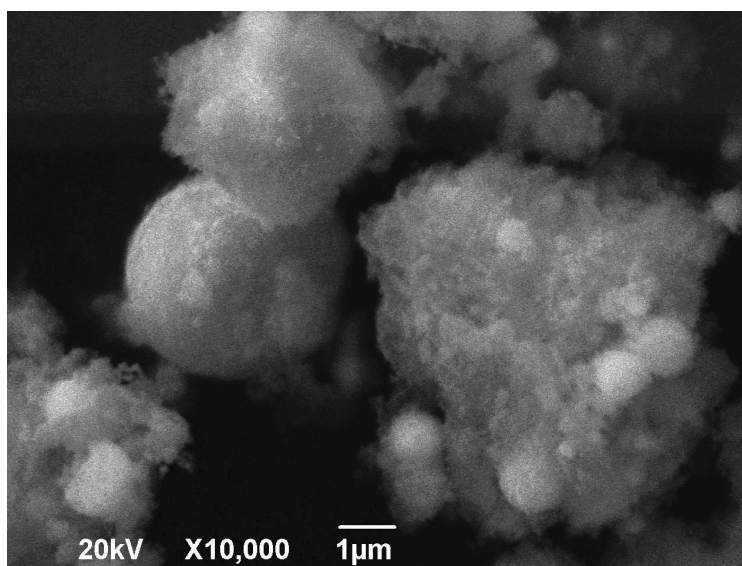


Рисунок 6

СЕМ-зображення сухого залишку твердої фази дисперсії, отриманої у результаті плазмохімічної обробки розчину-імітанта



них у воді органічних речовин [12]. Водночас з руйнуванням органічних речовин у плазмохімічному реакторі утворюються наночастинки металів та оксидів металів. Під час завантаження реактора гранулами заліза [8] утворюються сферичні наночастинки металевого заліза, його оксидів та феригідритів. На рисунку 6 добре видно агрегати, що складаються з діамантнітого матеріалу (оксида або гідроксида заліза, феригідрити), в якому нерівномірно розподілені сферичні частинки заліза, які забезпечують високі магнітні властивості таких агрегатів.

Здатність наночастинок, що утворилися, сорбувати іони важких металів і радіонуклідів із розчину-імітанта, показано на рисунку 7.

Зважаючи на отримані результати, підвищення ступеня вилучення стронцію зі збереженням високого ступеня вилучення цезію і перехідних металів можна досягти за умови застосування попередньої плазмохімічної обробки розчину, який підлягає

очищенню, з подальшим застосуванням сорбенту на основі наночастинок гідроксиду заліза, модифікованих фероціанідами нікелю-калію.

Апробацію розроблених методів дезактивації проведено на зразках радіоактивно забруднених вод:

□ у результаті застосування модифікованих фероціанідами нікелю-калію залізооксидних нанотрубок активність за ^{137}Cs знизилася від 72 Бк/дм³ до 2 Бк/дм³, за ^{90}Sr – від 118 Бк/дм³ до 6 Бк/дм³;

□ у результаті застосування модифікованих фероціанідами нікелю-калію наночастинок гідроксиду заліза активність за ^{137}Cs знизилася від 113 Бк/дм³ до 2 Бк/дм³.

Висновки

1. Показано наявність небезпеки забруднення довкілля та впливу на здоров'я населення, зумовленої міграцією радіонуклідів із місць накопичення РПВ з поверхневими та підземними водами до місцевих водойм – джерел водопостачання населення.

2. Показано ефективність запропонованих сорбентів на основі моди-

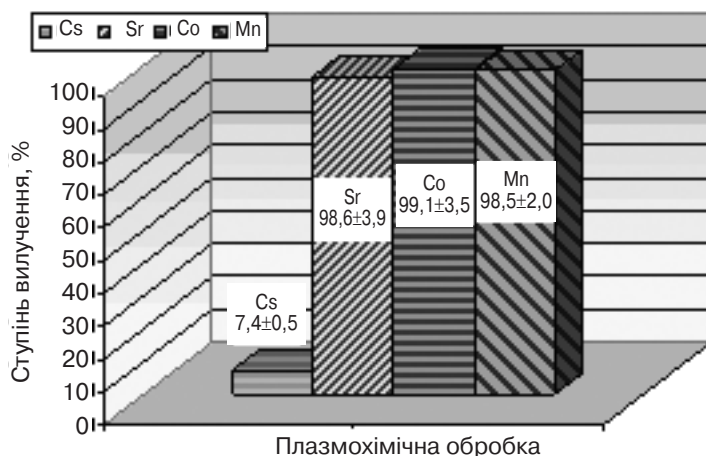
фікованих фероціанідами нікелю-калію залізооксидних мікро- та нанотрубок і наночастинок гідроксиду заліза (III), розмір яких становить переважно 1-100 мкм, для дезактивації рідких радіоактивних відходів, накопичених у Чорнобильській зоні відчуження, та для поточного контролю стану місць зберігання накопичених РПВ і радіаційного моніторингу.

3. Вибір алгоритму проведення дезактивації залежить від складу рідких радіоактивних відходів, які підлягають очищенню. Для підвищення ступеня вилучення стронцію зі збереженням високої ефективності вилучення цезію і перехідних металів доцільно застосувати попередню плазмохімічну обробку з подальшим використанням сорбентів на основі модифікованих фероціанідами оксидів/гідроксидів заліза.

REFERENCES

1. Bazyka D.A. and Sushko V.O. Osnovni radiologichni ta medychni naslidky avarii na ChAES [The Main Radiological and Medical Consequences of the Accident at the Chornobyl Nuclear Power Plant]. URL: <https://amnu.gov.ua/osnovni-radiologichni-ta-medychni-naslidky-avariyi-na-chaes/> (Mode of Access: 21.04.2023) (in Ukrainian).
2. Terekhova H.M., Strafun L.S., Pasteur I.P., Zamotaieva H.A. and Tronko M.D. Dynamichne sposterezhennia vuzlovoho zoba v chleniv Ukrainko-Amerykanskoj tyreoidnoi kohorty: analiz rezultativ 6 tsyktiv standartyzovanoho skryninhu [Dynamic Monitoring of Nodular Goiter in Members of the Ukrainian-American Thyroid Cohort: Analysis of the

Ступінь вилучення (%) іонів цезію, стронцію, кобальту, марганцю наночастинками дисперсії, отриманої у результаті плазмохімічної обробки розчину-імітанта



Results of 6 Cycles of Standardized Screening]. *Endokrynologi*. 2023 ; 28 (1) : 51-66. <http://doi.org/10.31793/1680-1466.2023.28-1.51> (in Ukrainian).

3. Shinji Ueda, Hidenao Hasegawa, Yoshihito Ohtsuka, Shinya Ochiai et al. Ten-Year Radiocesium Fluvial Discharge Patterns from Watersheds Contaminated by the Fukushima Nuclear Power Plant Accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021 ; 240 : 106759. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106759>

4. SSE «Chornobyl NPP». Povodzhennia z radioaktyvnymy vidkhodamy. [Management of Radioactive Waste]. URL: <https://chnpp.gov.ua/ua/activity/development-of-rav/povodzhennia-z-radioaktyvnymy-vidkhodamy> (Mode of Access: 21.04.2023). (in Ukrainian).

5. Panasiuk M.I., Matrosov D.T., Petrosenko Ye.I., Levin H.V., Liushnia P.A. et al. Rivni radioaktyvnoho zabrudnennia pidzemnykh vod prommaidanchyka chaes ta zasoby obmezhenia yoho rozpovsiudzhennia [Levels of Radioactive Pollution of Lower Waters of the Chornobyl Nuclear Power Plant and Means of Limitation of its Distribution]. In : Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliia [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl]. 2018 ; 30 : 87-92. <https://doi.org/10.31717/1813-3584.18.30.10> (in Ukrainian).

6. Zabulonov Yu.L., Kadoshnikov V.M., Melnychenko T.I., Puhach O.V., Shkapenko V.V. and Kuzenko S.V. Patent UA

№ 149345; MPC (2021.01) C02F 11/00, B82Y 40/00. Sposib oderzhannia nanokompozytu dlia ochyshchennia tekhnohenno zabrudnennykh ta radioaktyvnykh vod [The Method of the Nanocomposite Obtaining for the Treatment of Technogenically Polluted And Radioactive Waters]. № u 2021 02632 ; Applied 20.05.2021 ; Publ. 10.11.2021, Bull. № 45. (in Ukrainian).

7. Zabulonov Yu.L., Melnychenko T.I., Kadoshnikov V.M., Kuzenko S.V., Shkapenko V.V. et al. Patent UA № 152730; MPC (2023.01) G21F 9/06 (2006.01), B01J 20/00, B82B 3/00, B01J 23/70 (2006.01), B82Y 40/00. Sposib oderzhannia nanodispersii kompleksnoho sorbentu dlia ochyshchennia tekhnohenno zabrudnennykh ta radioaktyvnykh vod [The Method of Obtaining a Nanodispersion of a Complex Sorbent for the Purification of Technogenically Polluted and Radioactive Waters]. № u 2022 03053; Appl. 22.08.2022 ; Publ. 05.04.2023, Bull. № 14. (in Ukrainian).

8. Zabulonov Yu.L., Kadoshnikov V.M., Melnychenko T.I., Nikolenko V.O., Shkapenko V.V. and Puhach O.V. Patent UA № 150015 ; МПК (2021.01) C02F 1/00, G21F 9/04 (2006.01), C02F 9/00, C02F 101/20 (2006.01). Kompleksnyi plazmokhimichni sposib ochyshchennia tekhnohenno zabrudnennykh vod, shcho mistiat orhanichni rehovyny, radionuklidy i vazhki metaly [A Complex Plasma-Chemical Method of Cleaning Technogenically Polluted Waters Containing Organic Substances, Radionuclides and Heavy Metals]. № u 2021

04379 ; Appl. 27.07.2021 ; Publ. 22.12.2021, Bull. № 51 (in Ukrainian).

9. Rauwel P., Rauwel E. Towards the Extraction of Radioactive Cesium-137 from Water via Graphene/CNT and Nanostructured Prussian Blue Hybrid Nanocomposites: A Review. *Nanomaterials*. 2019 ; 9 (5) : 682. <https://doi.org/10.3390/nano9050682>.

10. Honcharuk V.V., Klishchenko R.Ye. and Korniienko I.V. Destruktsiia poverkhnevo-aktyvnykh i huminovnykh rehovyn u plazmokhimichnomu reaktori [Destruction of Surfactants and Humic Substances in Plazma-Chemical Reactor]. *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute»*. 2018 ; 4 : 85-90. URL: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2018.4.141259> (in Ukrainian).

11. Melnychenko T., Kadoshnikov V., Lytyvenko Yu., Pysanska I., Zabulonov Yu. et al. Nanodispersion of Ferrocyanides for Purification of Man-Made Contaminated Water Containing Caesium. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023; 261 : 107135. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107135>.

12. Danylov S.V., Zabulonov Yu.L., Kadoshnikov V.M. and Odukalets L.A. Plazmokhimichna destruktsiia stiikykh orhanichnykh zabrudnen u ridynakh [Plasma Chemical Destruction of Persistent Organic Pollutants in Liquids]. *Modeling and Information Technologies*. 2017 ; 79 : 71-80 (in Ukrainian).

Надійшло до редакції
18.04.2023