ISSN 1815-2066. Nauka innov. 2018, 14(6): 93—101 https://doi.org/10.15407/scin14.06.093

***Ю.Л. Забулонов*[1], *В.М. Буртняк*[1], *Л.А. Одукалець*[1], *О.В. Алєксєєва*[2], *С.В. Петров*[3]**

[1] Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»,
пр-т Палладіна, 34а, Київ, 03142, Україна,
+38044 502 1229, igns@nas.gov.ua
[2] Президія НАН України
вул. Володимирська, 54, Київ, 01030, Україна,
+380 44 239 6444, +380 44 234 3243, prez@nas.gov.ua
[3] Інститут газу НАН України,
вул. Дегтярівська, 39, Київ,03113, Україна
+380 44 456 4471, bor.ilienko@gmail.com

ПЛАЗМОХІМІЧНА УСТАНОВКА ОЧИЩЕННЯ ТРАПНИХ ВОД АЕС

Вступ. *В результаті роботи атомних електростанцій утворюються рідкі радіоактивні відходи (РРВ), в структурі яких значне місце займають трапні води. Технології та технічні засоби очищення трапних вод мають низку недоліків, які роблять процес очистки довготривалим і затратним.*

Проблематика. *Одним з найбільш перспективних сучасних способів очищення РРВ є плазмохімічний метод, який у вітчизняній практиці поводження з РРВ не використовується. Виконано експериментальне дослідження застосування плазмохімічних методів в процесі поводження з радіоактивними відходами АЕС для безпечної та ефективної обробки РРВ до стану, придатного для тимчасового зберігання.*

Мета. *Розробка сучасного вітчизняного обладнання для концентрування і вилучення радіоактивних елементів із розчинів комплексного сольового складу.*

Матеріали й методи. *При створені плазмохімічної установки використано методи математичного і комп'ютерного моделювання, натурного макетування, машинного проектування. Для дослідження технічних характеристик розробленої плазмохімічної установки, її особливостей виготовлено спеціальні розчини, що містили іони Cs^{+}, Sr^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, а також розчини з органічними компонентами.*

Результати. *Створено та досліджено експериментальну електророзрядну установку з використанням плазмохімічних технологій для очищення РРВ, зокрема, трапних вод, та визначено її характеристики.*

Висновки. *Розроблена експериментальна установка дозволяє проводити глибоку переробку РРВ та істотно зменшувати їх об'єми. Завдяки одностадійності процесу плазмохімічний метод є ефективним при вирішення проблем утилізації РРВ.*

Ключові слова: атомна енергетика, радіоактивні відходи, трапні води, екологічна безпека, плазмохімічний метод.

При нормальній роботі атомних електростанцій (АЕС) постійно накопичуються радіоактивні відходи (РАВ), які є однією з серйозних проблем як у сфері безпеки АЕС, так і в промисловій екології в цілому. В структурі РАВ особливе місце займають рідкі радіоактивні відходи (РРВ).

© ЗАБУЛОНОВ Ю.Л., БУРТНЯК В.М., ОДУКАЛЕЦЬ Л.А., АЛЄКСЄЄВА О.В., ПЕТРОВ С.В., 2018

Зважаючи на те, що РАВ становлять серйозну небезпеку для навколишнього середовища і людини, знешкодження та переробка рідких радіоактивних відходів, зокрема трапних вод, є важливим завданням сьогодення.

На сьогодні відомі наступні методи утилізації РРВ: упарювання, іонний обмін, ультрафільтрація, цементування, бітумування, скловування, осадження, сорбційні та мембранні методи. Вибір того чи іншого методу залежить

від хімічного та радіонуклідного складу РРВ і визначається станом радіонуклідів у розчині.

Одним із основних методів зменшення обсягу РРВ є упарювання, при якому відбувається зменшення їх початкового об'єму в 20—100 разів. Утворені концентрати мають складний радіонуклідний і хімічний склад, в них знаходиться значна кількість суспензій, нафтопродуктів, колоїдів, поверхнево-активних речовин (ПАР) і комплексоутворювачів. Проте цей метод має значні недоліки, що призводить до необхідності розвивати нові економічно ефективні та екологічно безпечні технології концентрування РАВ.

Для вилучення радіонуклідів з розчинів також можуть бути використані фізико-хімічні методи, що базуються на сорбційних, осаджувальних і мембранних процесах.

Використання сорбційних методів призводить до збільшення вторинних радіоактивних відходів. Також вони вимагають нових селективних неорганічних сорбентів, що зв'язують конкретні радіонукліди зі складних сольових розчинів.

Метод осадження застосовується як універсальний засіб вилучення радіонуклідів як в іонному, так і в колоїдному стані. Головний недолік методу — невисока ступінь очищення розчинів і утворення значної кількості вторинних відходів, що пов'язано з відсутністю методів селективного осадження радіонуклідів.

Мембранні методи широко використовуються для водопідготовки, опріснення морської води, в харчовій промисловості. Їх застосування для очищення РРВ на сьогодні не вийшло за рамки пілотних випробувань.

В цілому недоліками наявних технологій приведення трапних вод до стану нерадіоактивних відходів шляхом концентрування радіоактивних ізотопів в менший об'єм і стан, придатний для подальшого тривалого зберігання, є:

- ігнорування фазо-дисперсного стану радіонуклідів у РРВ;
- присутність у розчині органічних та комплексоутворюючих речовин;
- необхідність концентрування вилучених компонентів із супутнім утворенням додаткової кількості вторинних радіоактивних відходів із сорбентів, мембран, іонно-обмінних смол тощо, які було використано в технологічному процесі;
- утворення значної кількості вторинних радіоактивних відходів;
- необхідність застосування систем доочищення попередньо очищених від радіонуклідів розчинів;
- утворення легкорозчинних високоактивних кубових залишків, що потребують спеціальних методів їх утилізації.

Тому для збільшення ефективності очищення РРВ об'єктів ядерно-паливного циклу (ЯПЦ) та екологічної безпеки держави в цілому необхідним є нове сучасне обладнання, в якому усунуто зазначені вище недоліки. Таке обладнання повинно забезпечувати істотне скорочення витрат електроенергії на процес очищення РРВ, бути компактним, підвищувати ступінь очищення розчинів і зменшувати обсяг відходів, які потребують захоронення.

Для реалізації поставленого завдання у відділі ядерно-фізичних технологій Державної установи «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України» (ДУ«ІГНС НАН України») розроблено, виготовлено та апробовано сучасну електророзрядну лабораторну установку для очищення рідких радіоактивних відходів об'єктів ЯПЦ.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАПНИХ ВОД

На рис. 1 представлено джерела утворення трапних вод [1].

В трапних водах міститься значна кількість фонових металів (натрію, калію, кальцію, алюмінію), суттєва частина розчинів є азотнокислими (з концентрацією азотної кислоти від 2 до 6 моль/л), присутні також і лужні розчини. Типові концентрації макрокомпонентів розчинів досить високі — від 10 до 150 мг/л. Залежно від походження трапних вод, до їх складу можуть входити наступні компоненти (г/л):

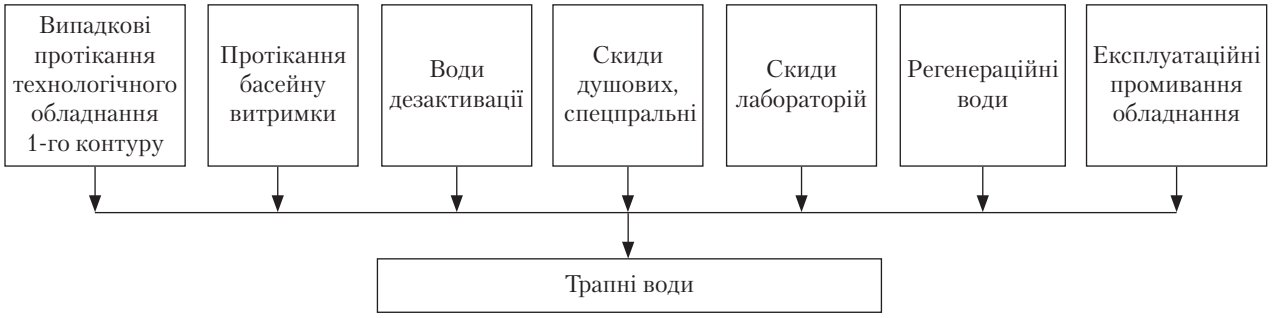

Рис. 1. Джерела утворення трапних вод

- розчинені солі — 0,1—40,0;
- розчинені органічні речовини — 0,1—5,0;
- мікросуспензії та колоїди — 0,01—0,1;
- нафтопродукти — 0,0—1,0.

Концентрація органічних сполук (відпрацьовані мастила, розчинники тощо) в трапних водах може становити 0,4—0,6 г/дм^3, а показник хімічного споживання кисню (ХСК) — 2000—3500 мг O_2/дм^3. Для подальшої переробки РРВ необхідне зниження вмісту органічних речовин до ХСК ≤ 200 мг O_2/дм^3 [2].

Особливість трапних вод полягає в тому, що, окрім радіонуклідів, ці води містять значну кількість іонів стабільних ізотопів, кількість яких на порядки перевищує вміст радіонуклідів.

Таблиця 1

Фазовий склад радіонуклідів у трапних водах

Ізотоп	Форма існування радіоелемента		
	Іонна	Колоїдна	Псевдоколоїдна
^{90}Sr	Майже при всіх значеннях pH — Sr^{2+}	—	При pH > 8,5 утворює негативно заряджені псевдоколоїди
^{90}Y	Може існувати до pH 9,0	При pH 4,5–9,0. При pH 7,0 формуються колоїдні часточки гідроокису та оксиду ітрію $Y(OH)_3$, Y_2O_3	При pH > 8,0 починають формуватися псевдоколоїди
^{137}Cs	При всіх значеннях pH у формі Cs^+	—	При pH > 7,2 формуються псевдоколоїди на присутніх у розчині забруднювачах
^{140}Ba	При pH 4,0—5,0 може існувати у формі Ba^{2+}	Формуються колоїдні агрегати $BaSO_4$	—
^{140}La	До pH 6,0—7,0 знаходиться в іонно-дисперсному стані La^{3+}	При pH > 9,0 починають утворюватися істинні колоїди гідрооксиду лантану $La(OH)_3$, La_2O_3	—
^{144}Ce	При pH < 2,5 може існувати у формі Ce^{3+}	При pH > 2,5 Ce (IV) у формі істинних колоїдів. При pH > 6,0 основні форми існування – продукти гідролізу	—
^{106}Ru	—	При pH 4,5—7,0Ru (IV) у колоїдній формі. При pH 5,5—8,0Ru (III) – у колоїдній формі	—
^{95}Zr	pH 0—1,6 — у формі Zr^{4+}; pH > 11,0—12,0 починається утворення цирконатів	pH 4,0—12,0— $ZrO(OH)^{3-}$	—

В трапних водах, крім радіонуклідів в іонній формі, міститься значна кількість радіонуклідів в колоїдній або псевдоколоїдній формі. Фазовий склад трапних вод наведено в табл.1.

У складі забруднювачів, що підлягають видаленню, наявні як лужні, лужноземельні, так і багатовалентні метали (Co, Mn, Cu та ін.), а також ПАР, фосфати й комплексоутворювачі.

Для досягнення максимального концентрування радіонуклідів при переробці рідких радіоактивних відходів бажано під час процесу мінімізувати або зовсім виключити введення в РВВ додаткових хімічних реагентів, а також намагатися вивести з обігу максимальну кількість нерадіоактивних баластних компонентів.

Для руйнування органічних відходів, які присутні в трапних водах, було розглянуто технологію плазмохімічних реакцій в рідині [3].

В ході роботи науково обґрунтовано та розроблено метод і лабораторний комплекс модифікованої плазмохімічної обробки таких відходів.

ПЛАЗМОХІМІЧНИЙ МЕТОД ОЧИЩЕННЯ ТРАПНИХ ВОД

Унікальність методу низькотемпературного плазмового електролізу полягає в тому, що він впливає на рідину за допомогою електричного і фотохімічного ефекту, а також електрохімічних реакцій, які протікають на електроді, зануреному в рідину. В розчині одночасно протікають реакції фотолізу, електролізу та хімічні реакції активних радикалів з компонентами розчину. Продукти цих реакцій, в свою чергу, можуть взаємодіяти один з одним.

Під дією електричного розряду в розчині відбувається розпад молекул води $H_2O \rightarrow OH\bullet + H\bullet$, утворюються окислювачі (радикали OH•) та відновники (атоми H•). Відповідно до закону збереження заряду, кількість елементів окислення дорівнює кількості елементів відновлення. При електричному розряді в газовій фазі (повітря) створюється значна концентрація озону. При взаємодії атомів водню з озоном утворюються радикали OH• ($H\bullet + O_3 \rightarrow OH\bullet + O_2$). Тому в присутності повітря в розряді утворюються тільки частки окислення.

Технологія плазмохімічної обробки води та рідких промислових стоків також належить до так званих деструктивних методів, в основі яких лежить внесення хімічних змін в структуру та склад молекул домішок. Взаємодія активних частинок плазми з хімічними сполуками або мікроорганізмами призводить до їх руйнування. Причому найбільш дієвим перетворенням є окислення речовин.

Високовольтний розряд (10—70 кВ) у воді генерує ударну хвилю, спричиняючи електрогідравлічний ефект, що характеризується потужністю (10^4—10^5 кг/см^2) і пружними коливаннями середовища (≈100 Гц). Такий розряд здійснює потужний комплексний вплив на рідину, інтенсифікуючи процеси в ній.

В цілому плазмовий розряд у трапних водах характеризується наступними складовими, які у комплексі будуть сприяти їх очищенню: термічна компонента — температура плазми досягає 5000 °С (вузька зона розділу газ-рідина), температура обробленої рідини з органікою досягає 44 °С); акустична компонента — ударна хвиля; електромагнітна компонента; ультрафіолетове випромінювання; озонування, хлорування.

Комплекс факторів впливу на трапні води плазмовим розрядом призводить до руйнування ПАР та активації сорбентів, що сприяє ефективному вилученню радіонуклідів.

Основні компоненти та функції установки

Експериментальна плазмохімічна установка складається з наступних елементів: реактор очищення рідини; електронний блок; блок високої напруги; система подачі та фільтрації рідини; система очищення рідини від грубих домішок; гідродинамічний кавітатор; пульт керування.

В установці використано реактор проточного типу, що представляє собою вертикальний циліндр з мультипіновим катодом у вигляді

щітки, який обертається, і анодом, розташованим на дні цього циліндра. Рідина потрапляє у реактор через систему подачі й очищення від грубих домішок. Схематично структуру реактора проілюстровано на рис. 2.

Розроблений плазмовий реактор може бути класифіковано як реактор бульбашкового розряду, де електричний розряд генерується безпосередньо у водному середовищі додаванням ззовні повітряних бульбашок [4]. Ця технологія одержання плазми полягає в барботуванні рідини — прокачуванні знизу вгору газу через сопло аноду, яке розташоване під заземленим електродом, як це показано на рис. 2. Електрод сопла знаходиться всередині діелектричної трубки, щоб уникнути будь-якого витоку енергії у воду.

За рахунок генерування плазми у вигляді бульбашок збільшується загальна площа поверхні контакту плазми з рідиною. Очікується, що більша площа поверхні буде спричиняти більш високу ефективність деструкції органічних речовин.

Барботування має ще й додаткову перевагу — створює умови для змішування розчину. Крім того, ініціювання розряду в газовій фазі зводить до мінімуму ерозію електроду, внаслідок чого подовжується термін служби установки. Бульбашки газу, які проходять через область розряду, значно збільшують щільність радикалів у плазмі. Повітря в установці барботується від заземленого електрода у напрямку мультипінових електродів високої напруги.

Генератор плазми використовує специфічний тип розряду, що є найбільш ефективним для зниження високих концентрацій забруднюючої речовини. Його основною властивістю є попередження надмірного нагріву плазмового газу та очищуваної рідини.

В реакторі було використано конструкцію з обертовим електродом, швидкість обертання якого становить до 1000 об./хв. Повітря прокачується через нерухомий електрод і розпорошується з утворенням туману бульбашок між електродами. Електрод, що обертається,

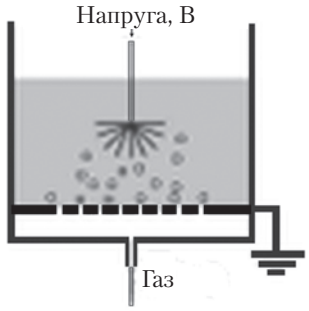

Рис. 2. Схема реактора установки: бульбашки піднімаються в бік мультипінового електроду з високою напругою

розподіляє ерозію рівномірно на нерухомому електроді, запобігаючи точковій корозії і небажаним змінам відстані між електродами. Крім того, це частково усуває обмеження масопереносу, які притаманні реакторам типу «пін-до-пластини», а також зменшує шляхи виникнення послаблення напруги між контактними електродами й стаціонарним електродом. Ефективність використання енергії для розкладання зростає зі збільшенням швидкості обертання. Система виявилася більш енергоефективною, ніж значна кількість технологій на коронній основі, однак і вона потребує подальшої оптимізації.

Основними технічними характеристиками установки є: струм розряду — 10 А; енергоспоживання — 3—5 кВт на 1 м^3 рідини; витрати повітря на 1 м^3 очищеної рідини — 3 м^3; час безперервної роботи — 8 год.; режими роботи (частота електророзрядних імпульсів) — 1—100 Гц; витратні матеріали (сорбенти) — не більше 1 % від об'єму очищувальної рідини; вага — не більше 60 кг.

Випробування установки та результати її роботи

Для отримання розчину, який імітує трапні води, було виготовлено спеціальний розчин, що містить іони Cs^+, Sr^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}. Для цього використали азотнокислі солі відповідних металів. Приготування розчину виконували при розчиненні розрахункового навішування кожної окремої солі в невеликій кількості води до повного її розчинення. Орієнтовна концентрація початкового розчину становила близько 100 мг/л відповідного іона.

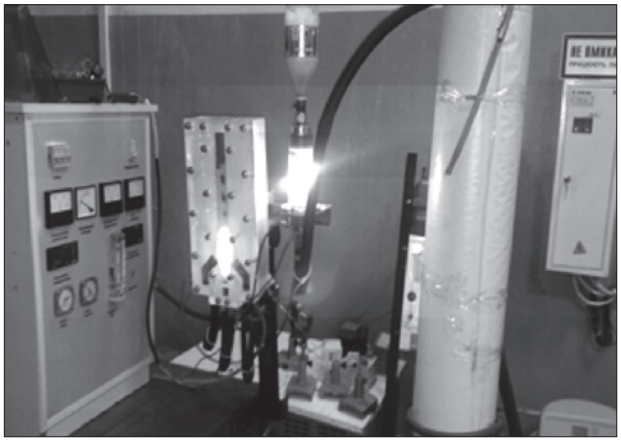

Рис. 3. Загальний вигляд розробленої експериментальної установки

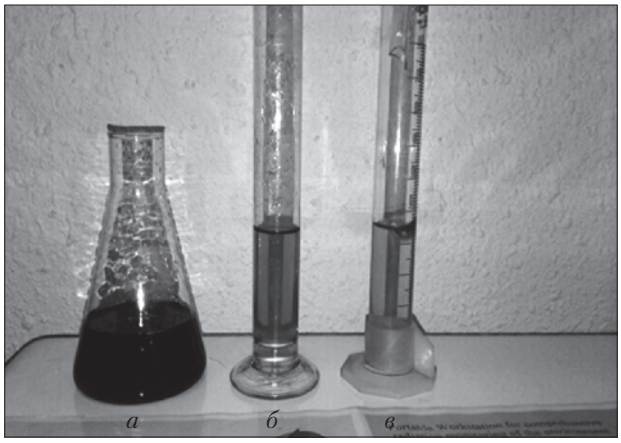

Рис. 4. Результати впливу плазми на експериментальні розчини з органічними компонентами: *а* — початковий розчин; *б* — розчин після обробки плазмою без фільтрації; *в* — розчин після обробки плазмою та подальшої фільтрації

Для проведення експерименту було виготовлено робочий розчин шляхом розведення початкового розчину у пропорції 1:10. Вимірювання концентрації іонів виконували методом атомної абсорбції на спектрометрі. Отримано такі результати: Cs — 6,2 мг/л; Sr — 6,6 мг/л; Co — 7,3 мг/л; Mn — 10 мг/л; Cu — 10 мг/л.

В результаті обробки робочого розчину плазмою в ній утворювалася суспензія часток, які з часом випадали в осад. Утворення осаду відбувається не рівномірно, що свідчить про наявність в зависі часток різних розмірів. Найбільш інтенсивно осад утворювався протягом перших хвилин після обробки. При цьому, зі збільшенням числа імпульсів відбувається зростання об'єму осаду. За результатами візуальних спостережень осадження часток в стоячій воді завершується після 1—2-х діб з моменту завершення обробки.

Таблиця 2

Ефективність деградації ТДА* та ДНТ* після обробки їх в експериментальній установці

Розчин	ХСК* початкового розчину, мг/л	ХСК розчину після обробки плазмою без фільтрації, мг/л	ХСК розчину після обробки плазмою та фільтрації, мг/л
З ТДА	7875	150	90
З ДНТ	5480	350	240

*ТДА — толуілендиамін, ДНТ — динітротолуол, ХСК — хімічне споживання кисню

При розкладанні складних органічних сполук утворюються органічні кислоти, що спричиняє зменшення pH розчину. Крім того, утворюється вуглекислий газ, який, розчиняючись у воді, також призводить до зменшення рівня pH. Зі зниженням кислотності розчину швидкість багатьох реакцій сповільнюється, тому процес окислення гальмується.

При використанні електродів зі сталі, при проходженні електричного розряду через рідину, можливі наступні процеси:

$$2Fe + O_2 \xrightarrow{discharge} 2FeO\downarrow$$

$$2FeO(OH) \xrightarrow{discharge} Fe_2O_3 + H_2O.$$

Тобто, в розчині з'являється незначна кількість Fe. Після обробки розрядами з параметрами U = 20 кВ, кількість імпульсів — 100, концентрація заліза становила 0,55 мг/л, тоді як до обробки — 0,48 мг/л.

Зміна властивостей розчину в установці спостерігалася і при використанні електродів з графіту. Виникає припущення, що під час обробки розчину плазмою відбувається реакція за такою схемою:

$$2H_2O + 2\bar{e} \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^-.$$

Таблиця 3

Характеристика експериментального розчину після очищення

Елемент	pH		Вміст солей, мг/л		ХСК, мг/л		Руйнування органіки, мг/л		Коефіцієнт очищення за вмістом солей, %
	до	після	до	після	до	після	до	після	
Cs	12	6	16,0	0,2	7656	70	8500	170	98,8
Sr	9	6	4,9	0,1	5673	80	7100	210	98,0
Co	14	8	11,3	0,2	7640	90	4300	150	99,9
Cu	11	7	29,2	0,5	8578	80	5900	190	98,3
Fe	12	7	44,8	0.8	8230	70	6300	70	99,98
Mn	11	8	32,4	0,6	8690	90	8100	140	98,2

Для перевірки впливу електроімпульсного розряду на складні розчини з органічними компонентами проведено низку експериментів з їх очищення. На рис. 3 показано загальний вигляд експериментальної установки, а на рис. 4 — результати досліду. Зведені результати дослідження наведено в табл. 2.

В табл. 3 наведено зміни параметрів розчину після очищення.

Для підсилення ступеня очистки розчинів складного ізотопного складу було використано універсальні сорбенти: монтморилоніти, цеоліти, нанокомпозиційні сполуки SiO_2, Fe_2O_3. В процесі обробки розчину плазмою відбувається деструкція сорбентів, в результаті чого утворюються наночастинки-наносорбенти, що характеризуються високою поверхневою площею (відношення площі поверхні до об'єму) та активністю — питома сорбуюча поверхня складає 2700 м^2 на 1 г речовини.

Не зважаючи на те, що сорбенти знижують вміст іонів металів та органічних сполук, використання плазми є обґрунтованим та виправданим, оскільки вона є і універсальним деструктором будь-якої органічної сполуки й ініціатором хімічної реакції, внаслідок якої відбувається більш ефективне вилучення (сорбція) органічних сполук з техногенно забруднених рідин.

При проведені експериментальних досліджень з впливу установки на руйнування ПАР в складних за своїм хімічним складом водних розчинах було отримано результати, які дозволяють зробити висновок, що процеси деструкції ПАР під дією імпульсного електричного розряду протікають зі ступенем їх розкладання не менше 98 %. Як продукт деструкції було виявлено CO_2, вихід якого становив не менше 60 % від загального вмісту вуглецю. При деструкції ПАР за рахунок утворення менш токсичних продуктів, порівняно з вихідними, відсутнє вторинне забруднення навколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

1. Проблема ядерної енергетики з екологічної точки зору — це, перш за все, проблема поводження з радіоактивними відходами. Тому переробка, концентрування, зберігання рідких радіоактивних відходів та остаточне захоронення їх наразі є актуальним питанням.

2. На основі інноваційного підходу було розроблено й апробовано експериментальну установку, що дозволяє проводити глибоку переробку рідких радіоактивних відходів та істотно зменшувати існуючі об'єми РРВ.

3. Електроімпульсний метод є комплексним одностадійним процесом для вирішення проблем утилізації рідких промислових відходів. Метод об'єднує комплекс фізичних явищ, що виникають при здійсненні імпульсних електричних розрядів, дозволяє проводити очищення трапних вод з різним вмістом та концентрацією радіонуклідів в умовах присутнос-

ті поверхнево-активних речовин та органічних забруднювачів.

4. Особливостями та перевагами розробленої установки є:

- окислювальні групи генеруються безпосередньо в зоні обробки рідини. Поєднання процесу аерації, генерації окислювачів й оброблюваної рідини в одному реакторі підвищує ефективність обробки трапних вод і знижує вартість як установки, так і всього процесу очищення;
- в процесі електророзряду внаслідок деструкції сорбентів утворюються наночастинки з високими сорбційними властивостями;
- модульна структура обладнання дозволяє компонувати установки різної продуктивності та за необхідності розміщувати їх на існуючих площах;
- можливість використання стандартних комплектуючих як вітчизняного, так і іноземного виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поводження з радіоактивними відходами при експлуатації АЕС ДП «НАЕК «Енергоатом» (станом на 31.12.2016). URL: http://www.energoatom.kiev.ua/ru/ (дата звернення: 06.07.2017).

2. Руденко Л.И., Хан В.Е., Кашковский В.И., Джужа О.В. Очистка трапных вод и кубовых остатков от органических соединений, трансурановых элементов и урана на Чернобыльской атомной электростанции. *Nauka innov.* 2014. Т. 10, № 3. С. 17—27.

3. Кравченко А.В., Кублановський В.С., Пивоваров А.А., Пустовойтенко В.П. *Низкотемпературный плазменный электролиз: Теория и практика*. Днепропетровск: ООО «Акцент», 2013. 223 с.

4. Patrick Vanraes, Anton Y. Nikiforov and Christophe Leys. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. URL: http://dx.doi.org/10.5772/61830 (дата звернення: 22.06.2017).

Стаття надійшла до редакції 04.04.18

REFERENCES

1. Povodgenniy z radioaktyvnymy vydhodamy pry expluatatzyy AES DP «NAEK «Energoatom». (2016). [in Ukrainian]. URL: http://www.energoatom.kiev.ua/ru/ (Last accessed: 06.07.2017).

2. Rudenko, L. I., Khan, V. E., Kashkovskyi, V. I., Dzhuzha, O. V. (2014). Oshistka trapnyh vod i kubovyh ostatkov ot organycheskyh soedinenyi, transuranovyh elementov i urana na Chernobylskoy atomnoy electrostantzyy. *Nauka innov.,* 10(3), 17—27 [in Ukrainian].

3. Kravchenko, A. V., Kublanovsky, V. S., Pyvovarov, A. A., Pustovoytenko, V. P. (2013). *Nyzkotemperaturny plazmenny elektrolyz: Teoriya i praktyka*. Dnepr [in Ukrainian].

4. Patrick Vanraes, Anton Y. Nikiforov and Christophe Leys. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition [in English]. URL: http://dx.doi.org/10.5772/61830 (Last accessed: 22.06.2017).

Received 04.04.18

Zabulonov, Yu.[1], Burtnyak, V.[1], Odukalets, L.[1], Alekseeva, E.[2], and Petrov, S.[3]

[1] Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine,
34a, Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine,
+38044 502 1229, igns@nas.gov.ua

[2] Presidium of the NAS of Ukraine,
54, Volodymyrska St., Kyiv, 01601, Ukraine,
+380 44 239 6444, +380 44 234 3243, prez@nas.gov.ua

[3] Institute of Gas the NAS of Ukraine,
39, Dehtiarivska St., Kyiv, 03113, Ukraine,
+380 44 456 4471, bor.ilienko@gmail.com

PLASMACHEMICAL PLANT FOR NPP DRAIN WATER TREATMENT

Introduction. As a result of the operation of nuclear power plants, liquid radioactive waste (LRW) is formed, which consist mainly of drain water. Technologies and technical means of drain water treatment have a number of disadvantages that make the treatment long and expensive.

Problem Statement. One of the most promising advanced methods of LRW treatment is the plasma chemical method that has not been used in domestic practice. An experimental study of plasma chemical method for the treatment of radioactive waste from nuclear power plants has been performed for ensuring safe and efficient treatment of liquid radioactive waste in order to make it suitable for temporary storage.

Purpose. Development of modern domestic equipment for concentrating and removing the radioactive elements from solutions of complex salt composition.

Materials and Methods. When creating a plasma chemical plant, methods for mathematical and computer modeling, full-scale prototyping, and machine design have been used. Special solutions containing Cs^{+}, Sr^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, and Mn^{2+}ions, as well as solutions with organic components, have been prepared to study the technical characteristics of the developed plasma chemical plant and its features.

Results. An experimental electric discharge plant for using the plasma chemical technologies for the treatment of liquid radioactive waste, in particular, drain water, has been created and studied; its characteristics have been determined.

Conclusions. The developed prototype plant enables to carry out integrated treatment of LRW and to significantly reduce its volume. Due to one-stage process, the plasma-chemical method is effective in solving the problems of LRW utilization.

Keywords: nuclear power, radioactive waste, drainage water, environmental safety, and plasma chemical method.

Ю.Л. Забулонов [1], В.М. Буртняк [1], Л.А. Одукалец [1], Е.В. Алексеева [2], С.В. Петров [3]

[1] Государственное учреждение «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины»,
пр-т Палладина, 34а, Киев, 03142, Украина,
+38044 502 1229, igns@nas.gov.ua

[2] Президиум НАН Украины,
ул. Владимирская, 54, Киев, 01030, Украина,
+380 44 239 6444, +380 44 234 3243, prez@nas.gov.ua

[3] Институт газа НАН Украины,
ул. Дегтяревская, 39, Киев, 03113, Украина,
+380 44 456 4471, bor.ilienko@gmail.com

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ОЧИСТКИ ТРАПНЫХ ВОД АЭС

Введение. В результате работы атомных электростанций образуются жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), в структуре которых значительное место занимают трапные води. Технологии и технические средства очистки трапных вод имеют ряд недостатков, которые делают процесс очистки длительным и затратным.

Проблематика. Одним из наиболее перспективных современных способов очистки ЖРО является плазмохимический метод, который в отечественной практике обращения с ЖРО не используется. Выполнено экспериментальное исследование применения плазмохимических методов в процессе обращения с радиоактивными отходами АЭС для обеспечения безопасной и эффективной обработки ЖРО до состояния, пригодного для временного хранения.

Цель. Разработка современного отечественного оборудования для концентрирования и извлечения радиоактивных элементов и растворов комплексного солевого состава.

Материалы и методы. При создании плазмохимической установки использовались методы математического и компьютерного моделирования, натурного макетирования, машинного проектирования. Для исследования технических характеристик разработанной плазмохимической установки, ее особенностей были изготовлены специальные растворы, содержащие ионы Cs^{+}, Sr^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, а также растворы с органическими компонентами.

Результаты. Создана и исследована экспериментальная электроразрядная установка по использованию плазмохимических технологий для очистки ЖРО, в частности, трапных вод, и определены ее характеристики.

Выводы. Разработанная экспериментальная установка позволяет проводить глубокую переработку ЖРО и существенно уменшать их объемы. Благодаря одностадийности процесса плазмохимический метод эффективен при решении проблем утилизации ЖРО.

Ключевые слова: атомная энергетика, радиоактивные отходы, трапные воды, экологическая безопасность, плазмохимический метод.