

## Аналіз процесу плазмової переробки радіоактивних відходів

Семерак М. М.

Національний університет «Львівська політехніка»,  
м. Львів, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-6398>

Лис С. С.

Національний університет «Львівська політехніка»,  
м. Львів, Україна  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7359-1177>

Коваленко Т. П.

Національний університет «Львівська політехніка»,  
м. Львів, Україна  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6866-5979>

Показано можливість плазмової переробки низько або середньо-активних радіоактивних відходів в реакторі з дуговими плазматронами. Запропоновано конструкцію реактора плазмової переробки радіоактивних відходів, яка дозволяє підвищити ефективність процесу плазмового перероблення радіоактивних відходів (РАВ) шляхом збільшення швидкості та інтенсивності процесу плазмового піролізу.

Досліджено різні способи підготовки, дозування та подачі РАВ в плазмохімічний реактор. Відходи, що подаються в реактор можуть знаходитися в різних агрегатних станах: твердому, рідкому або газоподібному, в залежності від яких застосовують ті чи інші способи підготовки, дозування та подачі сировини в плазмохімічний реактор. Для збільшення поверхні розділу фаз тверді відходи необхідно подрібнити. Ступінь подрібнення відходів залежить від способу їх подальшої переробки.

Реактор дозволяє переробляти радіоактивні відходи змішаного типу, що включають як горючі, так і негорючі компоненти. Відходи можуть бути упаковані, або подрібнені. Вибрані технологічні режими мають забезпечувати температуру в камері плавлення від 1500 °C і у верхній частині до 250 °C в зоні виходу пірогазу, що перешкоджає винесенню з печі летючих сполук ряду радіонуклідів та важких металів, а також дозволяє переробляти відходи і зливати шлаковий розплав без додавання флюсів.

Плавлений шлак являє собою базальтоподібний моноліт, де вміст оксиду алюмінію досягає 28%; оксиду кремнію до 56%; оксиду натрію від 2,5 до 11 %. Отримуваний радіоактивний шлак є надзвичайно стійким до хімічного впливу.

Отримуваний в шахтній печі пірогаз матиме теплотворну здатність близько 5 МДж/нм<sup>3</sup>. Це дозволяє, після початкового нагріву за допомогою плазматрона, підтримувати необхідну температуру в камері допалювання за рахунок тепла, що виділяється при згорянні пірогазу, при вимкненому плазмовому джерелі нагрівання, і ефективно спалювати смоли і сажу.

Доведено, що плазмова технологія переробки РАВ дозволяє суттєво скоротити об'єми відходів та розміщувати їх на тривале зберігання з найбільш ефективним використанням сховищ.

**Ключові слова:** радіоактивні відходи, плазмова переробка, плазмохімічний реактор, дуговий плазматрон, радіаційна безпека, шлаковий компаунд.

© Семерак М. М., Лис С. С., Коваленко Т. П., 2019

У багатьох країнах, що мають атомну енергетику та ядерні об'єкти, накопичилися значні кількості радіоактивних відходів (РАВ). Значна кількість радіоактивних відходів утворюється при переробці відпрацьованого ядерного палива, переробка якого породжує безліч складних проблем пов'язаних з радіаційною та екологічною безпекою високоактивних відходів переробки.

Найбільш поширений сьогодні спосіб поводження з РАВ є цементування, що призводить до збільшення обсягу радіоактивних матеріалів [1]. Ще один спосіб — спалювання радіоактивних відходів, який є одним з найбільш поширених та ефективних, що дозволяє значно скорочувати обсяг відходів. На спалювання спрямовуються виділені в результаті сортування лише горючі компоненти відходів. Недоліком спалювання радіоактивних відходів є утворення небезпечного для транспортування та захоронення продукту — золи, яка сконцентровує в собі радіоактивні ізотопи.

Значно більш ефективним методом є плазмова переробка РАВ, яка полягає в тому, що низько або середньоактивні радіоактивні відходи переробляються в герметичній печі з дуговими плазматронами. В результаті згорають всі сторонні матеріали і залишається лише невелика кількість радіоактивного залишку — шлакового компаунду.

Плазмові методи прямої переробки радіоактивних відходів дозволяють отримувати продукт, придатний для транспортування і захоронення, або довгостроково зберігання. Їх перевагою перед методом спалювання є як збільшення коефіцієнту скорочення об'єму відходів в десятки раз і зниження об'ємів утворення вторинних відходів, так і отримання продукту у вигляді плавленого шлакового компаунда з максимальним ступенем включення радіонуклідів і високою хімічною стійкістю до впливу навколишнього середовища.

Саме тому у світі зростає інтерес до можливості використання плазмових технологій з метою зменшення об'єму і вартості переробки радіоактивних відходів.

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проблема утилізації радіоактивних відходів є однією з найбільших у атомній енергетиці. На всіх етапах ядерно-промислового циклу накопичуються значні кількості твердих РАВ [1, 2], так в реакторах АЕС загальною електричною потужністю 1 ГВт на рік утворюються 300–500 м<sup>3</sup> твердих РАВ, а від переробки опроміненого палива утворюється ще 10 м<sup>3</sup> високоактивних РАВ, а також 40 м<sup>3</sup> відходів середньої активності та 130 м<sup>3</sup> відходів низької активності.

Радіоактивні відходи (РАВ) являють собою радіоактивні матеріали різного агрегатного стану (гази, розчини, матеріали та вироби, біологічні об'єкти) для поводження з якими розроблені відповідні національні норми, правила і стандарти, засновані на рекомендаціях Міжнародної комісії з радіологічного захисту (МКРЗ) та Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ). У категорії гамма-випромінюючих РАВ з невідомою питомою активністю застосовується класифікація, яка підрозділяє їх на низько-, середньо- і високоактивні за критерієм потужності поглиненої в повітрі дози на відстані 0,1 м від поверхні, на якій знаходяться РАВ [2].

Високоактивні РАВ від переробки палива так само, як і високоактивні відходи, що виникають під час експлуатації АЕС, містять радіонукліди, отримані в процесі

Таблиця 1. Номенклатура РАВ України за видами технологій атомної енергетики і позатехнологічних джерел

Виробництво і процеси	Види радіоактивних відходів	
	Рідкі РАВ	Тверді РАВ
1. Підприємства ядерно паливного циклу		
1.1. Видобуток і збагачення уранової руди	Шахтні води, маточні розчини	Відходи споживання, хвости після вилугування
1.2. Збагачення урану і виготовлення тепловиділяючих елементів і збірок	Маточні розчини та промислові води	Відходи споживання, залишки від переробки
1.3. Виробництво електричної і теплової енергії на атомних станціях	Промислові води, контурні води, розчини дезактивації, регенератори, пульпа	Фільтри, обладнання, одяг, ізоляційні матеріали, обладнання першого контуру
1.4. Радіохімічні технології на перероблюючих підприємствах ЯПЦ	Промислові води, води санітарних пропускників і спецпралень, розчини дезактивації, регенератори, однохвостовий розчин, пульпа	Фільтри, обладнання, одяг, оболонки твелів
1.5. Вивід об'єктів атомної промисловості з експлуатації, утилізація блоків і конструкцій	Води санпропускників і спецпралень, промислові води, контурні води, розчини дезактивації, регенератори, пульпа	Одяг, засоби індивідуального захисту, обладнання, ізоляція, кабельна продукція, будівельне сміття, облицювання, обладнання першого контуру, деталі реактора
2. Відновлення територій, забруднених в результаті експлуатації об'єктів і аварійних ситуацій		
2.1. Території, які радіоактивно забруднені в результаті аварій (Україна — зона відчуження ЧАЕС)	Вода і мулові відкладення водоєм-оохолоджувачів і накопичувачів; забруднені ґрунти і підземні води, води басейнів витримки, гідроокиснювальні пульпи басейнів-сховищ	Радіоактивно забруднений ґрунт, тверді РАВ, відходи дезактивації сховищ

ядерних реакцій: продукти поділу і трансуранові елементи (ТУЕ), які утворюються з атомів  $^{238}\text{U}$  в активній зоні ядерного реактора при поглинанні ними нейтронів з подальшим  $\beta$ -розпадом. Ці високоактивні відходи складають за обсягом близько 3 % всіх радіоактивних відходів, що утворюються в світі, але вони містять до 95 % всієї активності [2, 3]. Радіонуклідний склад продуктів поділу дуже складний і залежить від часу опромінення та динамічної рівноваги їх утворення, вигорання та  $\alpha$ -розпаду.

Поряд з продуктами поділу, відходи АЕС і відходи від переробки палива містять активовані продукти корозії оболонок палива та обладнання, реагенти, передбачені хіміко-технологічними процесами, а також трансуранові елементи. За рахунок високої активності РАВ вимагають додаткових заходів при їх зберіганні й захороненні. У процесі виробничої діяльності ядерно паливного циклу (ЯПЦ) України утворюються різні види РАВ [2, 4], їх номенклатура приведена в таблиці 1.

**Мета.** Проблема утилізації РАВ з кожним роком буде зростати, так як за прогнозними оцінками МАГАТЕ в найближчі роки необхідно буде зняти з експлуатації близько 65 ядерних реакторів АЕС і 260 ядерних установок, що використовуються в наукових сферах, термін експлуатації яких наближається до завершення [3–5]. Тому метою роботи є аналіз процесу плазмової переробки радіоактивних відходів, який дозволяє отримувати продукт, придатний для транспортування і захоронення або довгострокового зберігання.

### Матеріали та методи дослідження

Запропоновано конструкцію реактора плазмової переробки радіоактивних відходів рис. 1, яка дозволяє підвищити ефективність процесу плазмового перероблення РАВ шляхом збільшення швидкості та інтенсивності процесу плазмового піролізу, а також дозволяє вирішити проблеми екологічної утилізації РАВ.

Запропоновано реактор, який має бункер завантаження РАВ, шахтну піч, два плазмотрони, камеру плавлення, канал відводу розплавленого шлаку та пірогазу. Шахтна піч виконана з вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів з зовнішнім облицюванням сталевим листом. Джерелом нагріву печі служать встановлені в нижній частині печі два дугові плазмотрони, які забезпечують нагрів повітря до температур 3500–7000 °С. Як плазмостворюючий газ використовується повітря. Для нагріву печі та камери допалювання передбачені плазмотрони постійного струму електричної потужністю 100–150 кВт кожен, які забезпечують температуру в камері плавлення 1500–1800 °С. Камера піролізу реактора виконана у вигляді циліндра, розміщеного вертикально в шахтній печі, а отвір для зливу розплавленого шлаку розміщений в нижній частині камери плавлення, що виключає зависання палива в камері піролізу та накопичення його в нижній частині камери плавлення.

Реактор дозволяє переробляти радіоактивні відходи змішаного типу, що включають як горючі, так і негорючі компоненти. Відходи можуть бути упаковані, або подрібнені.

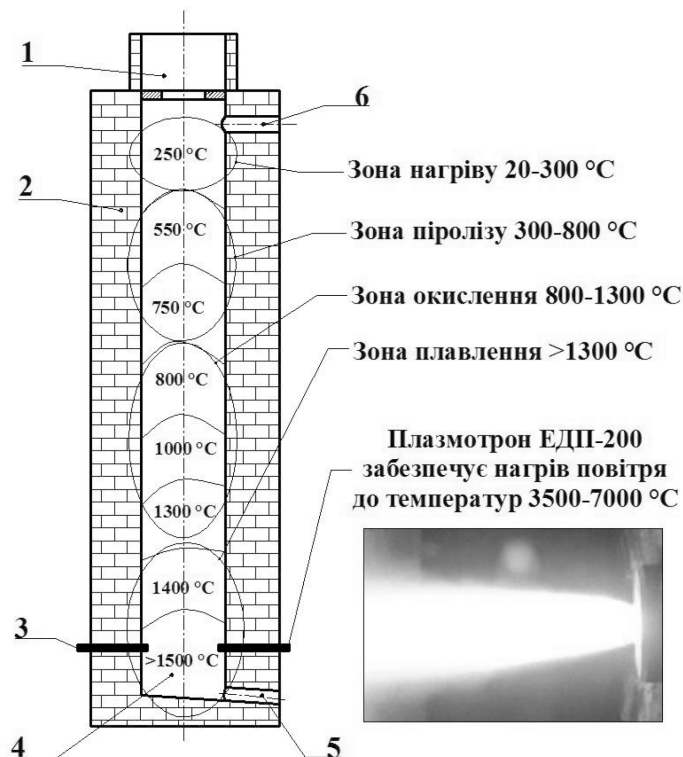


Рис. 1. Схема реактора плазмової переробки РАВ: 1 — бункер завантаження РАВ; 2 — шахтна піч; 3 — плазмотрон; 4 — камера плавлення; 5 — канал відводу розплавленого шлаку; 6 — канал відводу пірогазу.

Вибрані технологічні режими мають забезпечувати температуру в камері плавлення від 1500 °C (рис. 1), а у верхній частині в зоні виходу пірогазу до 250 °C, що перешкоджає вивезенню з печі легких сполук ряду радіонуклідів та важких металів, а також дозволяє переробляти відходи і зливати шлаковий розплав без додавання флюсів.

Отримуваний в шахтній печі пірогаз матиме теплотворну здатність близько 5 МДж/м<sup>3</sup> [2]. Це дозволяє, після початкового нагріву за допомогою плазмотрона, підтримувати необхідну температуру в камері допалювання за рахунок тепла, що виділяється при згорянні пірогазу, при вимкненому плазмовому джерелі нагрівання, і ефективно спалювати смоли і сажу. Об'єми газів, що виходять на виході з шахтної печі коливаються в межах від 100 до 150 м<sup>3</sup>/год, на виході установки — від 450 до 550 м<sup>3</sup>/год. Винесення радіонуклідів цезію-137 та 134 з шахтної печі не повинно перевищувати 10 %, кобальту-60 — 3 %, трансуранових елементів — в межах 1 % при середній об'ємній активності пірогазу на виході з шахти 0,1–2 кБк/м<sup>3</sup> (137Cs).

### Підготовка і подача радіоактивних відходів

Відходи, що подаються в реактор можуть знаходитися в різних агрегатних станах: твердому, рідкому або газоподібному, в залежності від яких застосовують ті чи інші способи підготовки, дозування та подачі сировини в плазмохімічний реактор.

Для збільшення поверхні розділу фаз тверді відходи необхідно подрібнити [6]. Ступінь подрібнення відходів залежить від способу їх подальшої переробки. Основними є три способи переробки відходів:

- відходи подаються в плазмовий струмінь і переміщуються разом з ним;
- відходи знаходяться в підвішеному шарі;
- відходи обробляються плазмою в нерухомому шарі.

При переробці подрібнених відходів в нерухомому шарі характерний лінійний розмір фракцій становить 10<sup>-2</sup>–10<sup>-1</sup> м; при переробці в киплячому шарі розмір фракцій дорівнює 10<sup>-3</sup>–10<sup>-2</sup> м, а при переробці порошку в плазмовому струмені — 10<sup>-6</sup>–10<sup>-4</sup> м. Подача твердих відходів в плазмохімічний реактор і дозування залежать від його фракційного складу.

Подача сипучих матеріалів в плазмохімічний реактор і попереднє їх дозування здійснюються механічними або пневматичними пристроями різних типів. Основні вимоги, що пред'являються до них — рівномірність подачі і можливість регулювання витрати.

**Перемішування відходів з плазмою в реакторі.** Їстотною відмінністю процесу перемішування в плазмохімічному реакторі від перемішування вільних струменів є обмеження обсягу перемішування стінками реактора. Потік можна вважати вільним, поки його граничний шар не зіткнеться зі стінками реактора. Взаємодія потоку зі стінками реактора призводить до додаткової турбулізації, зміни траєкторії руху, виникнення циркуляційних течій. Особливо ускладнюється процес при зіткненні зустрічних струменів.

Для типових варіантів організації процесу перемішування в плазмохімічному реакторі отримані емпіричні співвідношення, які дозволяють визначити довжину зони перемішування  $L$ . Знаючи величину  $L$ , можна легко визначити тривалість процесу перемішування

$$t = L/U,$$

де  $U$  — лінійна швидкість руху середовища в реакторі.

Найбільший інтерес представляють два варіанти, перемішування, при яких струмені плазми і сировини вводяться в реактор — попутно та під кутом.

Застосовується також подача декількох струменів в основний потік, причому можлива подача як струменів плазми в потік відходів, так і струменів відходів в потік плазми.

Схема перемішування плазмового теплоносія з попутним потоком холодних реагентів показана на рис. 2.

Плазма вводиться в циліндричну камеру змішування діаметром  $D$  через отвір діаметром  $d$ . У цьому випадку

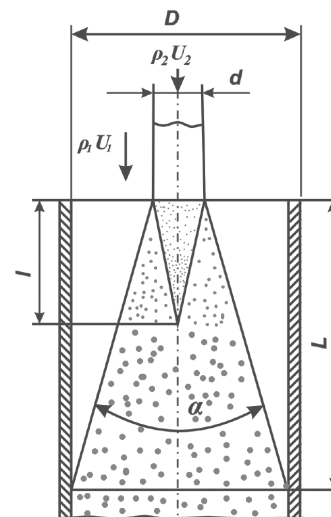


Рис. 2. Схема перемішування плазмового теплоносія з попутним потоком

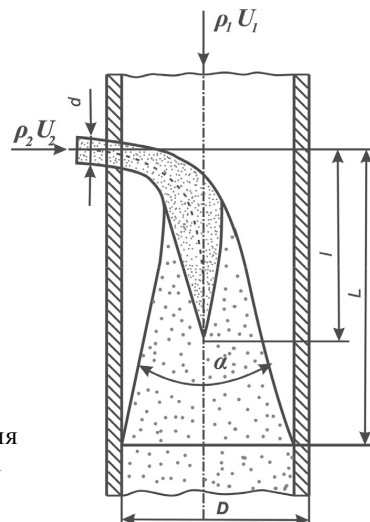


Рис. 3. Схема перемішування при поперечному введенні теплоносія в потік подрібнених РАВ

розподіл теплоносія в реакторі можна вважати сталим, коли зовнішні межі потоку перетнуться зі стінками циліндричної камери змішування за умови, що  $L$  більше довжини початкової ділянки струменя. Показано, що в широкому діапазоні значень числа Рейнольдса швидкості і температури турбулентних струменів

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 0,22 \dots 0,3.$$

Звідси отримуємо

$$L = D / \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = (1,7 \dots 1,8).$$

При поперечному введенні плазми в потік сировини (рис. 3) далекобійність плазмового струменя  $h$ , тобто відстань по радіусу від стінки реактора до осі введеного потоку в точці, де обидві течії стають співвісними, визначається виразом

$$h/d = 2,48q^{0,26},$$

тут

$$q = \frac{\rho_1 U_1^2}{\rho_2 U_2^2},$$

де  $\rho_1, U_1$  — густина і лінійна швидкість холодного газу відповідно;  $\rho_2, U_2$  — густина і лінійна швидкість гарячого газу відповідно.

Співвідношення справедливе для  $U_1 = 10-50$  м/с;  $U_2 = 400-700$  м/с;  $T = (3-4) \cdot 10^3$  К [6]. Довжина зони змішування  $L$  при введенні плазмового струменя в холодний потік менше, ніж при введенні холодного струменя в потік плазми, оскільки кут розкриття плазмового струменя більше, ніж холодного. Довжина зони змішування  $L$  в циліндричному каналі зазвичай не перевищує  $2D$ . Зменшуючи діаметр каналу  $D$ , можна зменшити  $L$ , проте завжди повинна дотримуватися умова  $L \gg 1$ . Виходячи з наближеної моделі турбулентного струменя і останньої умови, можна встановити співвідношення між діаметром гирла і змішувальної ділянки реактора  $D = (2,5-3,5)d$ .

При радіальній подачі кількох струменів в реактор (рис. 4) можливі два варіанти: струмені досягають осі змішування і розгортаються по потоку та струмені співударяються на осі змішування.

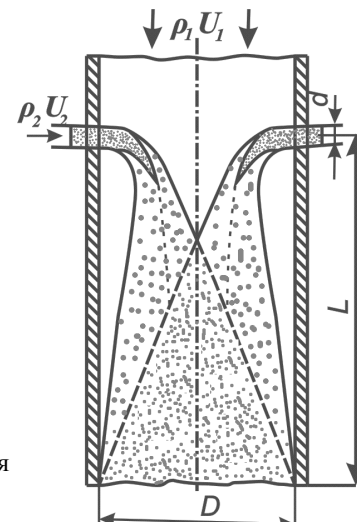


Рис. 4. Схема перемішування при радіальній подачі струменя

У другому варіанті перемішування є більш інтенсивним внаслідок додаткового дроблення стикаючихся струменів. При перемішуванні з співударяючимися струменями рекомендується співвідношення

$$D \leq (6 \dots 8)d.$$

Перемішування буде ефективним при  $q > 100$  [6]. Якщо  $q > 200-300$ , то довжина зони перемішування практично не залежить від значення гідродинамічного параметра  $q$  і зазвичай не перевищує  $2D$ . При радіальній подачі кількох струменів плазми пропорційно зменшується одинична потужність плазмотрона. Це дозволяє створювати агрегати великої одиничної потужності за рахунок роботи декількох плазмотронів на одну камеру змішування.

Експериментально встановлено, що змішування плазмових струменів з холодним потоком подрібнених РАВ найбільш інтенсивне при дотриманні умови

$$\varphi = \frac{F_{II} \rho_2 U_2^2}{F_{Я} \rho_1 U_1^2},$$

де  $F_{II}$  — площа перетину каналу закінчення потоку;  $F_{Я}$  — площа перетину ядра, що утворилося при зіткненні плазмових струменів.

З певним ступенем точності можна прийняти

$$F_{Я} = 0,785d^2,$$

де  $d$  — діаметр сопла плазмотрона.

Іноді більш доцільна подача кількох сировинних струменів в співвісний з реактором потік плазми. В цьому випадку задають допустиму тривалість змішування, а також витрату подрібнених РАВ. Потім визначають швидкість осевого потоку на вході в змішувач

$$U_1 = \left[ V_o \left( \frac{1}{0,004\beta \sqrt{T/P}} \right)^{-2} \right]^{\frac{1}{3}},$$

де  $V_o$  — об'ємна витрата газу осевого потоку при нормальних умовах;  $t$  — задана тривалість змішування;

$$\beta = \frac{1 + m_2/m_1}{1 + m_2/2m_1},$$

тут  $m_1$ ,  $m_2$  — масові швидкості осьового потоку і введених в нього струменів відповідно;  $T$ ,  $P$  — температура і тиск в початковому перерізі відповідно.

Діаметр осьового потоку в початковому перерізі визначається за рівнянням

$$D = 0,00114 \sqrt{\frac{V_{ol}}{U_1} \cdot \frac{T}{P}}.$$

Довжину змішування можна легко знайти з експериментальної залежності

$$L = 3,2D.$$

Використання закручених струменів інтенсифікує перемішування. Основними відмінностями закручених струменів є більш інтенсивне розширення струменя і швидке загасання надлишкової швидкості та інших параметрів уздовж її осі. Слід враховувати, що при інтенсивному закручуванні струменя поблизу гирла на осі виникає область поворотної течії. Перемішування можна також інтенсифікувати накладанням на систему коливань, наприклад, акустичних або гідродинамічних пульсацій.

**Нагрівання сировини.** Тривалість нагрівання газоподібних радіоактивних відходів дорівнює тривалості перемішування його з плазмою до молекулярного рівня [6]. Частинки рідких або твердих РАВ після перемішування мають більш низьку температуру, ніж навколишній їхній газ, і для їх нагрівання потрібен додатковий час. Для забезпечення швидкого нагрівання рідкі або тверді частинки, що подаються в плазموхімічний реактор, повинні бути досить малі. Це пояснюється тим, що нагрівання частинки плазмою відбувається за рахунок тепловіддачі від плазми до поверхні частинки і подальшого поширення теплоти всередину частинки шляхом теплопровідності. Критерієм відношення зовнішньої тепловіддачі і внутрішньої теплопровідності є критерій Біо

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda},$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі від плазми до частинки;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності частинки;  $l$  — характерний лінійний розмір частинки.

Якщо:

- $Bi < 1$  — лімітуючим буде зовнішній теплообмін;
- $Bi > 1$  — основним фактором підвищення ефективності теплообміну є збільшення часу нагрівання;
- $Bi = 1$  — зовнішні і внутрішні термічні опори рівні.

Внутрішнім термічним опором частки можна знехтувати, якщо  $Bi \leq 0,2$ . Визначимо, якому розміру частки це відповідає. Нехай коефіцієнт тепловіддачі від плазми до частинки  $\alpha = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>К), а коефіцієнт теплопровідності матеріалу частинки  $K = 0,1$  Вт/(м К), тоді

$$l = Bi \frac{\lambda}{\alpha} = 0,2 \frac{0,1}{100} = 0,0002 = 0,0002 \text{ м} = 200 \text{ мкм}.$$

Нагрівання твердих та рідких частинок часто супроводжується фазовими переходами: плавленням, випаровуванням або сублімацією.

Перехід речовини з конденсованої фази в газу при її нагріванні призводить до суттєвої інтенсифікації наступних процесів. Так, наприклад, гомогенне відновлення вольфраму з оксидів в газовій фазі відбувається швидше твердофазного відновлення.

Швидкість випаровування малих частинок можна оцінити за рівнянням

$$V_s = - \frac{dm}{dt} = 2\pi ab^2 \rho D,$$

де  $a$  — діаметр частинки;  $b$  — зовнішній діаметр плівки газу;  $\rho$  — парціальна густина парів випаровуваної речовини;  $D$  — коефіцієнт дифузії пари.

З рівняння стану ідеальних газів

$$\rho = PM/R_0T.$$

Для розрахунку коефіцієнта дифузії пари використаємо рівняння

$$D = \frac{3}{8\pi d^2} \left[ \frac{kT(m_1 + m_2)}{2\pi m_1 m_2} \right]^{1/2},$$

де  $d$  — діаметр молекули пари;  $m_1$ ,  $m_2$  — молекулярна маса пари і газу відповідно.

Слід враховувати, що частки конденсованої фази, як правило, немонодисперсні. Закон розподілу часток за розмірами визначається способом їх підготовки, наприклад, диспергуванням рідини форсунками, подрібненням твердих тіл [6]. Тому тривалість нагрівання окремих фракцій буде різною. У той час як дрібні частинки вже нагріються до заданої температури, великі будуть ще відносно холодними. Для інтенсифікації теплообміну частинок різних розмірів при  $Bi < 1$  необхідно забезпечити якомога більшу швидкість їх руху щодо газової фази. На рухому в плазмі частку діють дві протилежно спрямовані сили — сила інерції і сила тертя. Під дією сили тертя тверді частинки і газ неминуче зближуються і інтенсивність теплообміну стає мінімальною. Час, необхідний для досягнення стану, при якому швидкість частинки складе 95 % від швидкості газу (або навпаки), можна визначити з виразу

$$t = 0,666r^2\rho/\eta,$$

де  $\eta$  — динамічна в'язкість плазми;  $r$ ,  $\rho$  — радіус і густина частки відповідно.

Якщо на двофазний потік накласти коливання з частотою

$$f \geq 1,5^2/r^2\rho,$$

то кожен раз після прирівняння швидкості газу і конденсованих частинок газ буде прискорюватися щодо останніх, сприяючи інтенсифікації процесу тепловіддачі.

Частота коливань для частинок різного фракційного складу повинна бути різною. Так, для нагріву в повітряній плазмі твердих частинок радіусом  $0,5 \cdot 10^{-5}$  м і густиною

3970 кг/м<sup>3</sup> розрахункова частота коливань дорівнює 1030 Гц, а для частинок радіусом  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м і густиною 2520 кг/м<sup>3</sup> — 16,2 Гц [6]. Для максимальної інтенсивності теплообміну полідисперсних частинок необхідно високу частоту коливань, характерну для дрібних частинок, модулювати низькою частотою коливань, що відповідає великим часткам. Накладаючи на потік тільки низькочастотні коливання, можна вибірково інтенсифікувати теплообмін газу з великими частками, тобто зближувати тривалість нагріву частинок різних фракцій.

### Обговорення результатів дослідження

Стримуючим фактором у розвитку плазмових технологій переробки РАВ є високі ступені виносу легколетких радіонуклідів, перш за все <sup>137</sup>Cs [7], з плавителів та інших високотемпературних вузлів плазмових установок. Проте плазмові методи переробки дають можливість створювати в зоні хімічної реакції нерівноважні умови і за рахунок цього досягати надрівноважних виходів продуктів реакції, а також отримувати такі речовини, як з'єднання інертних газів. На відміну від відомих теплоносіїв плазма має низку специфічних властивостей, що значно розширюють її технологічні можливості. За допомогою плазми можна розкласти до атомів найміцнішу хімічну сполуку.

Плазмова переробка радіоактивних відходів дозволяє отримати шлаковий компаунд [2], радіонуклідний та хімічний склад якого представлений в табл. 2, 3.

Таблиця 2. Хімічний склад шлакового компаунду

Компонент	мас. %	Компонент	мас. %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,8–27,9	NiO	0,1–3,7
SiO <sub>2</sub>	35–56	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2–0,6
Na <sub>2</sub> O	2,6–11,1	CuO	0,1–3,1
K <sub>2</sub> O	0,6–2,1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5–8,5
CaO	2,1–8,7	ZnO	0,1–13
MgO	1,2–2,9	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3–0,7
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7–3,7	S	0,06–0,1
PbO	0,3–4,1		

Таблиця 3. Радіонуклідний склад шлакового компаунду

Компонент	Бк/кг	Компонент	Бк/кг
Σβ від. <sup>137</sup> Cs	$1 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^6$	<sup>226</sup> Ra	38–590
Σα від. <sup>239</sup> Pu	$5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^6$	<sup>239</sup> Pu	$(0,2 - 6) \cdot 10^5$
<sup>241</sup> Am	$(0,5 - 3) \cdot 10^4$	<sup>238</sup> Pu	$9 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^5$
<sup>137</sup> Cs	$3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$	<sup>238</sup> U	$(1 - 6) \cdot 10^3$
<sup>134</sup> Cs	$8 \cdot 10^2 - 1,3 \cdot 10^4$	<sup>235</sup> U	50–210
<sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y	$2 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5$	<sup>234</sup> U	$(0,3 - 1,4) \cdot 10^4$
<sup>60</sup> Co	$(0,5 - 3) \cdot 10^3$		

Плавлений шлак являє собою базальтоподібний моноліт, де вміст оксиду алюмінію досягає 28%; оксиду кремнію до 56%; оксиду натрію від 2,5 до 11 % (табл. 2).

У плавленому шлаку надійно фіксуються також оксиди важких металів, таких як свинець, нікель, мідь, цинк та ін. Густина шлаку становить 2,2–3,5 г/см<sup>3</sup>. Отримуваний радіоактивний шлак є надзвичайно стійким до хімічного впливу. Швидкість вилуговування радіонуклідів (<sup>137</sup>Cs) у воді [2, 7], в середньому, була на порядок нижча аналогічного показника для бор силікатного скла і перебувала на рівні  $10^{-6}$  г/см<sup>2</sup> на добу.

У той же час плазмові методи прямої переробки радіоактивних відходів дозволяють отримувати продукт, придатний для транспортування і захоронення або довгострокового зберігання.

### Висновки

1. У роботі показано можливість плазмової переробки низько або середньоактивних радіоактивних відходів в реакторі з дуговими плазматронами, в результаті чого залишається лише невелика кількість надзвичайно стійкого до хімічного впливу радіоактивного шлаку, в якому надійно фіксуються оксиди важких металів.

2. Досліджено способи підготовки, дозування та подачі РАВ в плазмохімічний реактор. Для збільшення поверхні розділу фаз тверді відходи необхідно подрібнити. Ступінь подрібнення відходів залежить від способу їх подальшої переробки.

3. Запропоновано конструкцію реактора плазмової переробки радіоактивних відходів, яка дозволяє підвищити ефективність процесу плазмового перероблення РАВ шляхом збільшення швидкості та інтенсивності процесу плазмового піролізу.

4. Використання плазмової технології переробки РАВ дозволить максимально скоротити об'єми відходів (приблизно в 50 раз) і розмішувати їх на тривале зберігання з найбільш ефективним використанням об'ємів сховищ і забезпеченням безпеки для навколишнього середовища.

### Список використаної літератури

- Носовский А. В., Алексеева З. М., Борозенец Г. П. та ін. Поводження з радіоактивними відходами / за ред. А. В. Носовського. Київ: Техніка, 2007. С. 84–135.
- Бурячок Т. О. та ін. Энергетика: історія, сучасність і майбутнє. Кн. 5: Электроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі / наук. ред. В. Н. Клименко, Ю. О. Ландау, І. Я. Сігал. Київ, 2013. 390 с.
- Ковтун Ю. В., Скібенко Є. І., Юферов В. Б. Магніто-плазмові сепараційні технології і їх можливе використання для переробки ВЯП і РАВ. *Ядерні та радіаційні технології*. 2007. № 1–2, т. 7. С. 72–80.
- Каренгин А. Г., Шахматова О. Д. Моделирование процесса плазменной утилизации жидких радиоактивных отходов. *Вестник науки Сибири*. 2012. № 2(3). С. 22–26.
- Gavrilovskiy D. V. and others. About the disposal of radioactive waste from nuclear reactors in Russia. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Natural science*. 2016. No. 4. P. 62–66.
- Каренгин А. Г. Плазменные процессы и технологии: учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2010. 160 с.
- Bobakov A. N. and others. Plasma Processing of Radioactive Caesium Wastes in Shaft Furnace. *Ecology and Industry of Russia*. 2014. No. 4. P. 4–8.

## References

1. Nosovskyy A. V., Alekseyeva Z. M., Borozenets' H. P. et al. (2007) Radioactive Waste Management [Povodzhennya z radioaktyvnymy vidkhodamy], za red. A. V. Nosovskoho, Tekhnika, Kiev, 84–135.
2. Buryachok T. O. et al. (2013), Power Engineering: History, Present, and Future. Book 5: Electrical Power Engineering and Environmental Protection. Power Engineering in Modern World [Enerhetyka: istoriya, suchasnist' i maybutnye. Kn. 5: Elektroenerhetyka ta okhorona navkolyshn'oho seredovyshcha. Funktsionuvannya enerhetyky v suchasnomu sviti], nauk. red. V. N. Klymenko, Yu. O. Landau, I. Ya. Sihal. Kiev, 390 p.
3. Kovtun Yu. V., Skibenko Ye. I., Yuferov V. B. (2007) Magnetic-Plasma Separation Techniques and Their Use for Spent Fuel and Radioactive Waste Processing [Mahnito-plazmovi separatsiyni tekhnolohiyi i yikh mozhlyve vykorystannya dlya pererobky VYAP i RAV], *Yaderni ta radiatsiyni tekhnolohiyi*, No. 1–2, Vol. 7, 72–80.
4. Karengin A. G., Shakhmatova O. D. (2012) “Modeling the plasma processing of liquid radioactive waste” [Modelirovaniye protsessa plazmennoy utilizatsii zhidkikh radioaktivnykh otkhodov], *Vestnik nauki Sibiri*, No. 2(3), 22–26.
5. Gavrilovskiy D. V. et al. (2016) “On the disposal of radioactive waste from nuclear reactors in Russia”, *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Natural science*. No. 4, 62–66.
6. Karengin A. G. (2010) Plasma Processes and Technologies: Handbook [Plazmennyye protsessy i tekhnologii: uchebnoye posobiye], Izd-vo TPU, Tomsk, 160 p.
7. Bobrakov A. N. et al. (2014) “Plasma processing of radioactive caesium wastes in shaft furnace”, *Ecology and Industry of Russia*. No. 4, 4–8.

## Аналіз процесу плазмової переробки радіоактивних відходів

Семерак М. М., Лыс С. С., Коваленко Т. П.

Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина

Показана возможность плазменной переработки низко или среднеактивных радиоактивных отходов в реакторе с дуговым плазматроном. Предложена конструкция реактора плазменной переработки радиоактивных отходов, которая позволяет повысить эффективность процесса плазменной переработки радиоактивных отходов (РАВ) путем увеличения скорости и интенсивности процесса плазменного пиролиза.

Исследованы разные способы подготовки, дозирования и подачи РАО в плазмохимический реактор. Отходы, которые подаются в реактор могут находиться в разных агрегатных состояниях: твердом, жидком или газообразном, в зависимости от которых применяют те или другие способы подготовки, дозирования и подачи сырья в плазмохимический реактор. Для увеличения поверхности раздела фаз твердые отходы необходимо измельчить. Степень измельчения отходов зависит от способа их дальнейшей переработки.

Реактор позволяет перерабатывать радиоактивные отходы смешанного типа, которые включают как горючие, так и негорючие компоненты. Отходы могут быть упакованы, или измельчены. Выбранные технологические режимы должны обеспечивать температуру в камере плавления от 1500 °C и в верхней части до 250 °C в зоне выхода пирогаза, что препятствует вынесению из печи летучих соединений ряда радионуклидов и тяжелых металлов, а также позволяет перерабатывать отходы и сливать шлаковый расплав без добавления флюсов.

Плавленный шлак является собой базальтоподобный монолит, где содержание оксида алюминия достигает 28%; оксида кремния 56%;

оксида натрия от 2,5 до 11 %. Получаемый радиоактивный шлак является чрезвычайно стойким к химическому влиянию.

Получаемый в шахтной печи пирогаз будет иметь теплотворную способность около 5 МДж/м<sup>3</sup>. Это позволяет, после начального нагрева с помощью плазматрона, поддерживать необходимую температуру в камере дожигания за счет тепла, которое выделяется при сгорании пирогаза, при выключенном плазменном источнике нагревания, и эффективно сжигать смолы и сажу.

Доказано, что плазменная технология переработки РАВ позволяет существенно сократить объемы отходов и размещать их на длительное хранение с наиболее эффективным использованием хранилищ.

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, плазменная переработка, плазмохимический реактор, дуговой плазматрон, радиационная безопасность, шлаковый компаунд.

## Analysis of the Plasma Recycling Process of Radioactive Waste

Semerak M., Lys S., Kovalenko T.

National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine

The possibility of the plasma processing of low-level or intermediate-level radioactive wastes in the reactor equipped with arc plasmatrons is shown. The reactor design for the plasma processing of the radioactive wastes that allows promoting the efficiency of the plasma processing of the radioactive wastes (RAW) by the increasing of the speed and the intensity of the plasma pyrolysis is proposed.

The various methods for RAW preparation, dosage and supply into the plasmochimical reactor have been investigated. The waste which is supplied to the reactor can be in various aggregate states (solid, liquid or gaseous) depending on which different kinds of preparation, dosage, and supply of RAW materials to the plasmochimical reactor are used. The solid waste must be ground for increasing of the phase separation surface. The degree of grinding of the wastes depends on their further reprocessing.

The reactor allows processing of the mixed-type radioactive waste, which includes both combustible and non-combustible components. The wastes can be packed or ground up. The selected technological regimes should provide temperature from 1500 °C in the melting chamber to 250 °C in the upper part in the pyrogas exit zone to prevent the flow-out of volatile compounds of a series of radionuclides and heavy metals from the furnace and to process the waste and merge slag melt without adding of fluxes.

The fused slag is a basaltiform monolith, where the content of aluminum oxide reaches 28%; silicon oxide up to 56%; sodium oxide from 2.5 to 11 %. The resulting radioactive slag is extremely resistant to the chemical influence.

The pyrogas produced in the shaft furnace will have a heating value of about 5 MJ/nm<sup>3</sup>. This allows, after initial heating by plasmatron, maintaining the required temperature in the combustion chamber due to the heat released during combustion of the pyrogas, when the plasma heating source is switched off, and burning the resin and soot effectively.

It is proved that the plasma technology for RAW reprocessing allows a significant reduction in waste volumes and waste placement for long-term storage with the most efficient use of storage facilities.

**Keywords:** radioactive waste, plasma processing, plasmochimical reactor, arc plasmatron, radiation safety, slag compound.

Отримано 06.09.2018