

УДК 004.94/621.039

doi:10.20998/2413-4295.2025.01.07

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВОЇ ПЕРЕРОБКИ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

С. С. ЛИС*, Ю. З. ВАШКУРАК

Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА

*e-mail: Lysss@ukr.net

АНОТАЦІЯ Розглядається технологія плазмової переробки радіоактивних відходів (РАВ) як перспективний метод вирішення екологічних проблем, пов'язаних з їх утилізацією. Представлено основні принципи роботи плазмової технології, яка використовує високотемпературну плазму для переробки РАВ. Описано процес, при якому органічні сполуки розкладаються на газоподібні компоненти, а неорганічні речовини переходять у склоподібний шлак. Проаналізовано переваги методу, включаючи значне зменшення об'єму відходів (до 90%), екологічну безпеку та можливість утилізації енергії. Розглянуто основні недоліки технології, такі як технологічна складність та висока енергоємність процесу. Представлено математичну модель фізико-хімічних процесів у плазмовому реакторі, що базується на рівняннях Нав'є-Стокса та системі рівнянь Максвелла. Описано механізми розкладу радіоактивних сполук та кінетику процесів у плазмовому реакторі. Наведено результати чисельного моделювання, які демонструють ефективність процесу плазмової переробки РАВ. Представлено оптимальні режимні параметри роботи установки та їх вплив на продуктивність процесу. Проаналізовано енергетичні характеристики та масовий баланс процесу. Показано, що технологія забезпечує високий ступінь очистки газових викидів (99.95%) та низьку залишкову активність шлаку ($<10^{-6}$ Кі/кг). Досліджено вплив температури на швидкість розкладу РАВ та ефективність іонізації. Представлено схему плазмової установки та описано її основні компоненти. Проаналізовано процеси тепло- та масопереносу в реакторі. Показано, що впровадження даної технології сприятиме вирішенню проблеми утилізації радіоактивних відходів та покращенню екологічної ситуації.

Ключові слова: математичне моделювання; плазмова переробка; радіоактивні відходи; високотемпературна плазма; склоподібний шлак; екологічна безпека; іонізація.

MATHEMATICAL MODEL AND NUMERICAL SIMULATION OF THE PLASMA PROCESSING OF RADIOACTIVE WASTE

S. LYS, Y. VASHKURAK

Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT The technology of plasma processing of radioactive waste as a promising method for addressing environmental issues related to its disposal is examined. The fundamental principles of plasma technology are presented, utilizing high-temperature plasma for the treatment of radioactive waste. The process is described, in which organic compounds decompose into gaseous components, while inorganic substances transform into a vitrified slag. The advantages of the method are analyzed, including a significant reduction in waste volume (up to 90%), environmental safety, and the potential for energy utilization. The main drawbacks of the technology, such as technological complexity and high energy consumption, are considered. A mathematical model of the physicochemical processes in a plasma reactor is presented, based on the Navier-Stokes equations and the Maxwell equation system. The mechanisms of radioactive compound decomposition and the kinetics of the processes in the plasma reactor are described. The results of numerical modeling are provided, demonstrating the efficiency of the plasma processing process. Optimal operating parameters of the system and their impact on process productivity are presented. The energy characteristics and mass balance of the process are analyzed. It is shown that the technology ensures a high degree of gas emission purification (99.95%) and low residual activity of the slag ($<10^{-6}$ Ci/kg). The influence of temperature on the decomposition rate of radioactive waste and ionization efficiency is studied. A schematic of the plasma installation is presented, along with a description of its main components. The processes of heat and mass transfer in the reactor are analyzed. It is demonstrated that the implementation of this technology will contribute to solving the problem of radioactive waste disposal and improving the environmental situation.

Keywords: mathematical modeling; plasma processing; radioactive waste; high-temperature plasma; vitrified slag; environmental safety; ionization.

Вступ

Радіоактивні відходи (РАВ) є однією з найсерйозніших екологічних та технічних проблем сучасності. Через високу небезпеку для довкілля та здоров'я людини необхідно розробляти ефективні методи їхньої переробки. Одним із перспективних підходів є плазмова переробка, що базується на

застосуванні високотемпературної плазми для знешкодження та інертизації відходів. Ця технологія дозволяє суттєво зменшити обсяг відходів, перетворюючи їх на хімічно стабільні матеріали.

Плазмова переробка ґрунтується на використанні плазмової дуги або індукційної плазми, яка нагріває відходи до температур 3000-10000°C. Внаслідок цього органічні сполуки розкладаються на

газоподібні складові, а неорганічні компоненти переходять у розплавлений стан. Утворений шлак після затвердіння набуває склоподібної структури, яка є хімічно інертною. Очищені гази можуть бути використані для безпечної переробки.

Основними перевагами цієї технології є значне зменшення об'єму відходів (до 90 %), екологічна безпека та можливість утилізації енергії, що утворюється в процесі. Отриманий склоподібний шлак не містить вільних радіонуклідів, що запобігає їхньому вилугуванню у навколишнє середовище. Завдяки високим температурам у реакторі практично всі токсичні органічні сполуки знищуються, що мінімізує ризики вторинного забруднення.

Однак плазмова переробка має і певні недоліки. По-перше, це технологічна складність процесу, що вимагає складного обладнання та високотемпературних матеріалів. По-друге, енергоємність такого підходу є досить високою, що збільшує вартість експлуатації установок. Крім того, технологія потребує ретельного контролю за вихідними газами, щоб запобігти викидам радіоактивних речовин.

На сьогоднішній день ця методика впроваджується у низці країн, зокрема у США, Франції, Японії та ін. В Україні така технологія може мати особливе значення для переробки відходів Чорнобильської зони та сховищ РАВ.

Таким чином, плазмова переробка є перспективним напрямом у сфері поводження з радіоактивними відходами. Вона поєднує в собі високий рівень екологічної безпеки, можливість зменшення об'ємів відходів та потенційне використання отриманої енергії.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми дослідження

Плазмова переробка радіоактивних відходів є інноваційною технологією, яка використовує високотемпературну плазму для зменшення об'єму, інертизації та стабілізації радіоактивних матеріалів. У даному процесі використовується плазмова дуга або індукційна плазма, що нагріває відходи до 3000–10000°C. Така висока температура розкладає органічні та леткі компоненти на прості гази, неорганічні компоненти (метали, оксиди) плавляться та утворюють склоподібний шлак, а гази очищуються та можуть використовуватися для отримання енергії.

У дослідженні [1] оцінено ефективність термічної плазмової обробки твердих радіоактивних відходів. Досліди проводили із застосуванням стабільних ізотопів Йоду, Кобальту, Цезію. Після термічної плазмової обробки шлак і залишковий газ були проаналізовані, щоб перевірити вплив часу процесу та потужності розряду на ефективність процесу. Обробка протягом 25 хв і 10 кВт була достатньою для зменшення маси шлаку на 50%. При збільшенні прикладеної потужності до 15 кВт

виразне скорочення часу обробки (10 хв) могло сприяти такому ж зменшенню маси. Результати показали, що обробка радіоактивних відходів термічною плазмою є перспективним методом управління та зменшення маси та об'єму для остаточного захоронення.

У роботі [2] для проведення науково-дослідної програми поводження з радіоактивними відходами введено в експлуатацію пілотну плазмову установку, яка оснащена плазмотроном постійного струму потужністю 50 кВт, який встановлено вертикально на верхній частині камери згоряння. Установка також складається з двофункціональної камери, системи водяного охолодження, системи подачі стисненого повітря та системи керування. Під час випробувань та введення в експлуатацію системи плазмового пальника команда виділила такі основні проблеми: система не працює в умовах негативного тиску, полум'я плазми не може проникнути до дна зразка.

Технології плазмової переробки надаються для знищення небезпечних органічних речовин, для іммобілізації радіоактивних відходів і важких металів, а також для роботи зі складними змішаними відходами. Система РАМ (плазмово-дуговий плавильник) розташована в Кореїському науково-дослідному інституті атомної енергії (KAERI) [3] та була створена, щоб продемонструвати можливість цієї технології для обробки небезпечних та низькорadioактивних відходів корейських ядерних установок. Для вивчення поводження з різними відходами, включаючи радіоактивні низькоактивні відходи та змішані відходи, було проведено пілотні випробування осклювання з використанням сурогатних відходів, таких як горючий матеріал, затверділі смоли в цементі, неорганічні матеріали, сталь, скло та затверділий цемент борної кислоти в системі плазмово-дугової плавки. Результати аналізу зразків осклюваного продукту з використанням відпрацьованого газу, зібраного протягом періоду випробувань, показують, що більшу частину змішаних відходів і відходів низького рівня радіоактивності, які утворюються на ядерній установці, можна переробити. РАМ може обробляти радіоактивні та токсичні відходи, а також змішану форму обох, а відхідний газ може бути ефективно перероблений, якщо система працює під негативним тиском.

У процесі плазмової переробки радіоактивних відходів у реакторі рис. 1 радіонукліди зазнають певних змін, які залежать від їхньої фізико-хімічної природи та поведінки при високих температурах [4-12].

Основні процеси, які впливають на радіонукліди, включають [7]:

1. Термічне розкладання та іонізація. При температурах 3000–10000°C органічні сполуки, що містять радіонукліди, повністю руйнуються, а самі радіонукліди переходять у вільну атомарну або іонізовану форму.

2. Перерозподіл між фазами. Леткі радіонукліди (наприклад, ^{137}Cs , ^{129}I , ^{106}Ru) можуть переходити у газову фазу. Менш леткі радіонукліди (наприклад, ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{238}U) залишаються у твердій фазі.

3. Закріплення в склоподібному шлаку. Більшість радіонуклідів, особливо важкі метали та актиноїди (уран, плутоній, америцій), зв'язуються в склоподібній матриці шлаку, що забезпечує їхню хімічну інертність і запобігає вилугуванню в навколишнє середовище.

4. Очищення газів. Леткі радіонукліди можуть бути захоплені в газоочисних системах (фільтри, скрубери) та переведені у форму безпечних для зберігання залишків.

Схема плазмової установки для переробки радіоактивних відходів включає (рис. 1):

1. Завантаження відходів: контейнери з РАВ подаються в герметичну камеру.

2. Плазмовий реактор: всередині діє плазмова дуга ($3000-10000^\circ\text{C}$), яка розкладає органічні речовини та плавить неорганічні.

3. Газоочисна система: вилучає небезпечні гази, фільтрує та нейтралізує їх.

4. Система охолодження та затвердіння шлаку: отриманий склоподібний матеріал безпечний для зберігання.

5. Система збору енергії: гази можуть використовуватися для генерації електроенергії.

6. Контейнери для зберігання: охолоджений шлак поміщається в сховища.

У табл. 1 наведено основні переваги та недоліки технологія плазмової переробки РАВ.

Таблиця 1 – Основні переваги та недоліки

Категорія	Опис
Переваги	
Зменшення об'єму	До 90% від початкового обсягу відходів.
Стабільність продукту	Отриманий шлак є хімічно інертним і може зберігатися без ризику вилугування радіонуклідів.
Екологічна безпека	Мінімізація шкідливих викидів у довкілля.
Енергетична ефективність	Потенційне використання утворених газів для виробництва електроенергії.
Виклики та недоліки	
Високі витрати	Велика енергоємність процесу та вартість обладнання.
Технологічна складність	Необхідність складних систем контролю та безпеки.
Обмежене впровадження	Поки що застосовується лише в кількох країнах у пілотних або промислових масштабах.

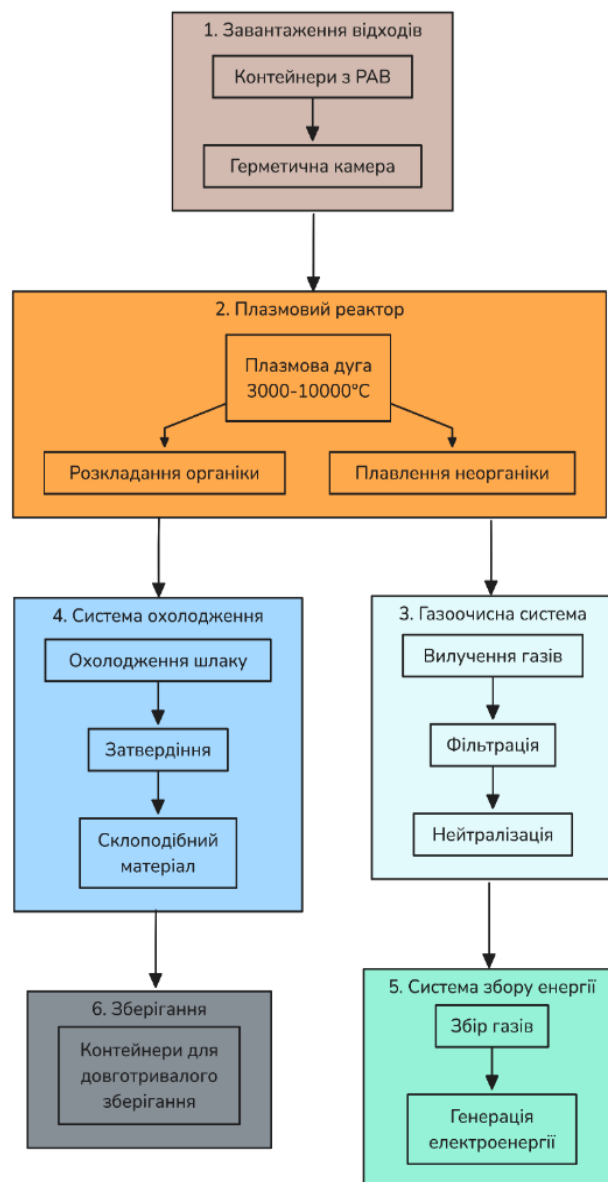


Рис. 1 – Блок-схема плазмової установки для переробки радіоактивних відходів

Таким чином, технологія плазмової переробки забезпечує високу стабільність кінцевого продукту, мінімізуючи ризики поширення радіонуклідів у навколишнє середовище.

Мета роботи

Метою роботи є розробка математичної моделі та проведення чисельного моделювання процесу плазмової переробки радіоактивних відходів для оптимізації параметрів технологічного процесу, підвищення ефективності утилізації відходів та забезпечення екологічної безпеки.

Математична модель фізико-хімічних процесів у плазмовому реакторі

Математична модель повинна описувати фізико-хімічні процеси, що відбуваються в плазмовому реакторі при переробці радіоактивних відходів.

Розглянемо плазмовий реактор для переробки радіоактивних відходів (рис. 2), у якому відбуваються процеси тепло- та масопереносу, електромагнітні явища, хімічні реакції та процеси іонізації.

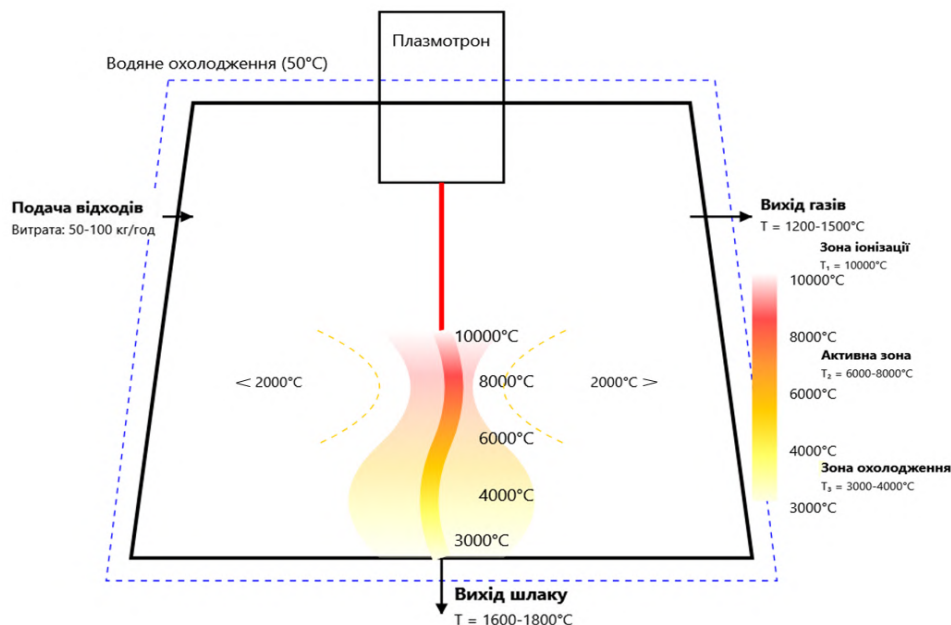


Рис. 2 – Схема плазмовий реактор для переробки радіоактивних відходів

Основні особливості реактора:

1. Плазмотрон розташований вертикально для оптимального формування плазмової дуги;
2. Потужність плазмотрона – 100-150 кВт;
3. Робоча температура – 3000-10000°C;
4. Продуктивність – 50-100 кг/год;
5. Ступінь скорочення об'єму до 90%;
6. Загальний ККД – 75-80%.
7. Корпус має подвійні стінки для водяного охолодження;
8. Відходи подаються збоку для кращого перемішування у плазмовій дузі;
9. Шлак видаляється знизу під дією гравітації;
10. Гази відводяться через верхню бічну частину.

Математична модель, що описує фізико-хімічні процеси в плазмовому реакторі при переробці радіоактивних відходів, є складною багатокомпонентною системою рівнянь. Дана модель базується на фундаментальних законах збереження маси, енергії та імпульсу. Основою моделі є система рівнянь Нав'є-Стокса для опису газодинаміки плазмового потоку:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} + \mathbf{j} \mathbf{B}. \quad (2)$$

Рівняння неперервності описує зміну густини компонентів плазми в часі та просторі:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) = S_i, \quad (3)$$

де n_i – концентрація i -го компоненту, $\mathbf{v}_i$ – швидкість, S_i – член, який показує наскільки швидкість зміни густини частинок відхиляється від простої конвекції через зовнішні впливи.

На рис. 3 представлено розподіл концентрацій компонентів плазми, тобто зміна концентрації електронів і іонів у реакторі.

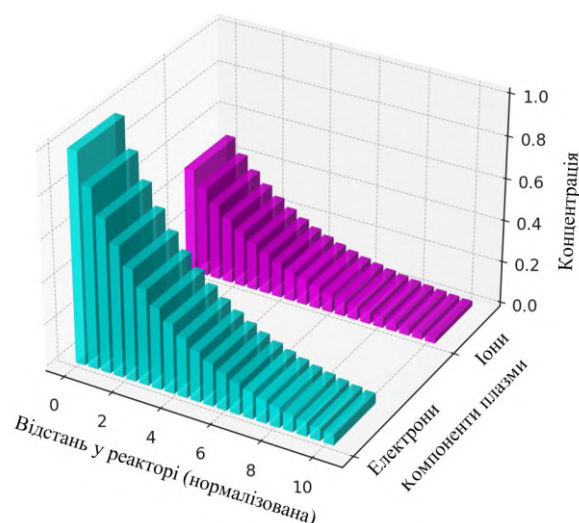


Рис. 3 – Гістограма розподілу концентрацій компонентів плазми

Рівняння збереження імпульсу враховує вплив електромагнітних сил на рух заряджених частинок. Енергетичний баланс системи описується рівнянням збереження енергії з урахуванням нагріву:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \vec{v}) + \rho \nabla T + \sigma E^2, \quad (4)$$

Електромагнітні процеси описуються системою рівнянь Максвелла.

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho_e}{\epsilon_0}, \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

де ρ – густина, h – ентальпія, k – коефіцієнт теплопровідності, T – температура, σ – електропровідність, E – напруженість електричного поля, B – магнітна індукція, j – густина струму, μ^0 – магнітна проникність вакууму, ϵ^0 – електрична проникність вакууму, ρ_e – густина заряду.

Рівняння Пуассона використовується для розрахунку розподілу електричного потенціалу.

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_e}{\epsilon_0}, \quad (6)$$

де ∇^2 – оператор Лапласа, φ – електричний потенціал, ρ_e – об'ємна густина заряду, ϵ_0 – електрична стала.

Модель враховує процеси іонізації атомів та молекул під дією електричного поля. Швидкість іонізації залежить від напруженості електричного поля та властивостей газу рис. 4.

$$R_{\text{ion}} = n_e n_n k_{\text{ion}} (E / N), \quad (7)$$

де k_{ion} – коефіцієнт іонізації, що залежить від приведенного електричного поля E/N .



Рис. 4 – Залежність швидкості іонізації від приведенного електричного поля

Процеси рекомбінації іонів та електронів також включені в модель. Температурне поле в реакторі описується рівнянням теплопровідності.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q. \quad (8)$$

Конвективне теплоперенесення враховується через відповідні члени в рівнянні енергії. Радіаційний теплообмін між плазмою та стінками реактора моделюється окремо. Теплофізичні властивості плазми залежать від її температури та складу. Такі коефіцієнти, як в'язкість, теплопровідність, дифузія розраховуються з кінетичної теорії.

Хімічні реакції в плазмі описуються системою кінетичних рівнянь.

$$\frac{d[A_i]}{dt} = j \sum (\nu_{ij}^+ - \nu_{ij}^-) k_j \prod_m [A_m]^{\nu_{mj}}, \quad (9)$$

де k_j – константа швидкості реакції згідно закону Арреніуса:

$$k_j = A_j \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (10)$$

Швидкості реакцій залежать від температури згідно закону Арреніуса рис. 5.

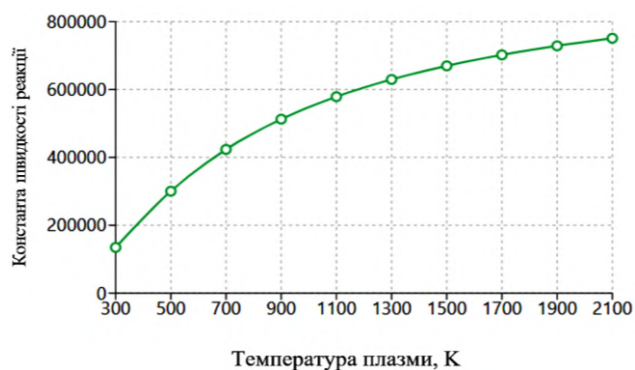


Рис. 5 – Температурна залежність константи швидкості реакції

Температурна залежність константи швидкості реакції демонструє експоненціальне зростання швидкості реакції з підвищенням температури.

Опишемо основні механізми розкладу радіоактивних сполук у плазмовому реакторі. Модель враховує різні фізико-хімічні процеси, включаючи радіоактивний розпад, термічний розклад та плазмохімічні реакції.

Кінетика радіоактивного розпаду описується рівнянням:

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i + \sum_j b_{ji} \lambda_j N_j, \quad (11)$$

де N_i – кількість ядер i -го радіонукліду, λ_i – стала радіоактивного розпаду i -го нукліду, b_{ji} – коефіцієнт розгалуження розпаду j -го нукліду в i -тий.

Швидкість термічного розкладу радіоактивних сполук описується рівнянням:

$$\frac{d[RAW_i]}{dt} = -k_{th,i}[RAW_i] \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{RT}\right), \quad (12)$$

де $[RAW_i]$ – концентрація i -тої радіоактивної сполуки, $k_{th,i}$ – константа швидкості термічного розкладу, $E_{a,i}$ – енергія активації, R – газова стала, T – температура

Кінетика плазмохімічного розкладу описується рівнянням:

$$\frac{d[RAW_i]}{dt} = -k_{pl,i}[RAW_i][e^-]n_e, \quad (13)$$

де $k_{pl,i}$ – константа швидкості плазмохімічної реакції, $[e^-]$ – концентрація електронів, n_e – густина електронів.

Система кінетичних рівнянь для продуктів розкладу:

$$\frac{d[P_k]}{dt} = \sum_i (v_{ki}^+ - v_{ki}^-) k_i [RAW_i] \prod_m [A_m]^{v_{mi}}, \quad (14)$$

де $[P_k]$ – концентрація k -го продукту розкладу, v_{ki} – стехіометричні коефіцієнти, $[A_m]$ – концентрація компонентів реакційної суміші.

Рівняння збереження маси в системі:

$$\sum_i \frac{M_i d[RAW_i]}{dt} + \sum_k M_k \frac{d[P_k]}{dt} = 0, \quad (15)$$

де M_i – молярна маса i -тої радіоактивної сполуки, M_k – молярна маса k -го продукту розкладу.

Дана модель інтегрується з загальною моделлю плазмового реактора через температурну залежність констант швидкості реакцій, концентрацію та густину електронів у плазмі, енергетичний баланс системи.

Представлена математична модель дозволяє описати основні механізми розкладу радіоактивних сполук у плазмовому реакторі та може бути використана для прогнозування ефективності розкладу різних типів радіоактивних відходів, оптимізації параметрів процесу, оцінки утворення продуктів розпаду.

Результати чисельного моделювання плазмової переробки РАВ та обговорення результатів дослідження

Чисельне моделювання плазмової переробки радіоактивних відходів дозволяє оцінити ефективність цього процесу (табл. 2). Було проаналізовано температурний розподіл у різних зонах реактора, де центральна частина характеризується найвищою температурою, що забезпечує ефективний термічний розклад відходів. Робоча зона має достатню температуру для підтримки основних хімічних реакцій, а периферійна область слугує для охолодження продуктів реакції. Біля стінок температура є найнижчою завдяки використанню системи водяного охолодження.

Таблиця 2 – Результати чисельного моделювання плазмової переробки РАВ

Параметр	Значення	Одиниці виміру	Примітки
Температура плазмової дуги	8500-10000	°C	Максимальна в центрі
Температура зони реакції	3000-7500	°C	Основна робоча зона
Температура периферійної зони	1000-2500	°C	Зона охолодження
Температура пристінкового шару	50-200	°C	Водяне охолодження
Початкова швидкість розкладу	0.85	кг/год	При запуску
Максимальна швидкість розкладу	4.2	кг/год	При $T=7000^\circ\text{C}$
Ступінь розкладу (1 год)	92.5	%	Від початкової маси
Ефективність іонізації	75-80	%	В плазмовій зоні
Концентрація електронів	$10^{16}-10^{18}$	см^{-3}	В зоні реакції
Питомі енергозатрати	2.8-3.2	кВт·год/кг	На одиницю маси
ККД плазмового розігріву	78	%	Ефективність нагріву
Теплові втрати	15-20	%	Через стінки та газу
Ступінь конверсії	95-97	%	Загальна ефективність
Вихід шлаку	25-30	%	Від маси відходів
Вихід газової фази	5-8	%	Від маси відходів
Робоча температура	5500-6500	°C	Оптимальний діапазон
Час перебування	45-60	хв	У реакційній зоні
Питома потужність	120-140	кВт	На установку
Витрата плазмоутворюючого газу	15-20	$\text{м}^3/\text{год}$	Для стабільної роботи
Ефективність газоочистки	99.95	%	Від шкідливих домішок
Залишкова активність шлаку	$<10^{-6}$	Ki/kg	Нижче норм
Продуктивність	75-90	кг/год	При стабільній роботі
Коефіцієнт скорочення об'єму	8-10	разів	Від початкового
Енергоефективність	70-75	%	Загальна
Експлуатаційна надійність	95	%	Коефіцієнт готовності

Початковий етап кінетики розкладу радіоактивних відходів характеризується невеликою швидкістю, яка поступово збільшується при підвищенні температури. За високих температур досягається максимальна швидкість процесу, а за певний проміжок часу вдається розкласти значну частину вихідного матеріалу.

Так як, енергетичні характеристики процесу визначають його ефективність, тому було оцінено питомі енергозатрати для переробки одиниці маси відходів та визначено ефективність нагріву плазми. Значна частина енергії витрачається на підтримання необхідних температурних умов, деяка кількість тепла втрачається через стінки реактора. Важливим показником є коефіцієнт корисної дії установки, який визначає рівень енергоефективності всього процесу.

Масовий баланс дозволив оцінити вихідні та кінцеві продукти реакції. Переважна частина відходів переходить у безпечні форми, тобто утворюється певна кількість шлаку, який можна утилізувати, а газова фаза містить залишкові продукти реакції.

Оптимальні режимні параметри визначають стабільну роботу установки, а підтримка температурного діапазону забезпечує максимальну продуктивність. Екологічні показники процесу вказують на його безпечність, адже газоочисні системи забезпечують максимальне видалення шкідливих домішок, а викиди радіонуклідів залишаються в межах безпечних норм.

Отже, чисельне моделювання підтверджує перспективність плазмової переробки РАВ. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів, а впровадження такої технології сприятиме екологічній безпеці.

Висновок

Плазмова переробка радіоактивних відходів представляє собою перспективну технологію, що дозволяє ефективно вирішувати проблему утилізації РАВ. Дослідження показало, що використання високотемпературної плазми забезпечує значне скорочення об'єму відходів – до 90% від початкового обсягу.

Математична модель, розроблена для опису фізико-хімічних процесів у плазмовому реакторі, базується на фундаментальних законах збереження маси, енергії та імпульсу. Чисельне моделювання підтвердило високу ефективність процесу, демонструючи високу ступінь конверсії та ККД.

Важливим аспектом технології є утворення хімічно інертного склоподібного шлаку, який безпечний для довготривалого зберігання, з залишковою активністю менше 10^{-6} Кі/кг. Система газоочистки забезпечує ефективність видалення шкідливих домішок на рівні 99.95%, що підтверджує екологічну безпеку процесу.

Дослідження показали оптимальний час перебування відходів у реакційній зоні 45–60 хвилин

при робочій температурі 5500–6500°C. Енергоефективність процесу складає 70–75%, при питомих енергозатратах 2.8–3.2 кВт·год/кг. Технологія демонструє високу експлуатаційну надійність з коефіцієнтом готовності 95%. Встановлено, що концентрація електронів у зоні реакції досягає $10^{16} - 10^{18}$ см⁻³, що забезпечує ефективну іонізацію на рівні 75-80%. Процес характеризується стабільною продуктивністю 75-90 кг/год при оптимальних режимних параметрах. Важливою перевагою є можливість переробки різних типів РАВ, включаючи змішані відходи.

Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати ефективність розкладу різних типів радіоактивних відходів та оптимізувати параметри процесу. Температурний розподіл у реакторі забезпечує оптимальні умови для термічного розкладу та хімічних реакцій. Теплові втрати через стінки та газу складають 15–20%, що є прийнятним показником для такого високотемпературного процесу. Система водяного охолодження ефективно підтримує температуру пристінкового шару в межах 50–200°C. Вихід шлаку становить 25-30% від маси відходів, а газової фази – 5–8%. Витрата плазмоутворюючого газу 15–20 м³/год забезпечує стабільну роботу установки. Коефіцієнт скорочення об'єму відходів у 8–10 разів підтверджує високу ефективність технології, яка сприятиме вирішенню екологічних проблем, пов'язаних зі зберіганням та утилізацією РАВ.

Список літератури

1. Gonçalves M. F. S., Filho G. Petraconi, Couto A. A., Sobrinho A. S. da Silva, Miranda F. S., Massi M. Evaluation of thermal plasma process for treatment disposal of solid radioactive waste. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 311. P. 114895. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114895.
2. Salihuddin R., Baan R., Zakaria N. & and others. Radioactive Waste Treatment and Conditioning Using Plasma Technology Pilot Plant: Testing and Commissioning. *Research and Development Seminar*. 2016. URL: <https://inis.iaea.org/records/2qdy4-9xf47> (дата звернення 02.02.2025).
3. Min B. K., Song Y., Choi P.-S., Jung W.-K., Wansuk Ch. Study on the vitrification of mixed radioactive waste by plasma arc melting. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2007. 13. P. 57–64.
4. Heberlein J., Murphy A.B. Thermal plasma waste treatment. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2008. 41. P. 053001. doi: 10.1088/0022-3727/41/5/053001.
5. Burkhard R., Hoffelner W., Eschenbach R. C. Recycling of metals from waste with thermal plasma. *Resour. Conserv. Recycl.* 1994. 10. P. 11–16. doi: 10.1016/0921-3449(94)90033-7.
6. Montel J. M. Minerals and design of new waste forms for conditioning nuclear waste-Les minéraux et la formulation de nouvelles matrices de stockage pour les déchets radioactifs. *Comptes Rendus Geosci.* 2011. 343. P. 230–236. doi:10.1016/j.crte.2010.11.006.

7. Semerak M., Lys S., Kovalenko T. Analysis of the process of plasma processing of radioactive waste. *Nuclear and radiation safety*. 2019. 1(81). P. 23–29. doi: 10.32918/nrs.2019.1(81).04.
8. Kovtun Yu. V., Skibenko Ye. I., Yuferov V. B. Magnetic-Plasma Separation Techniques and Their Use for Spent Fuel and Radioactive Waste Processing. *Nuclear and radiation technology*. 2007. No. 1–2. Vol. 7. P. 72–80.
9. Erdogan A. A., Yilmazoglu M. Z. Experimental and numerical investigation of medical waste disposal via plasma gasification, *Applied Energy*. 2024. Vol. 353, Part A. P. 122014. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122014.
10. Zhang T., Zhang J., Yu Y., Zhang Z., Wang G. Up-rotating plasma gasifier for waste treatment to produce syngas and intensified by carbon dioxide. *Energy*. 2023. Vol. 270. P. 126910. doi: 10.1016/j.energy.2023.126910.
11. Ma Y., Chu H., Zheng B. Research progress of plasma melting technology in radioactive waste treatment of nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. Vol. 198. P. 110307. doi: 10.1016/j.anucene.2023.110307.
12. Prado E. S. P., Miranda F. S., Petraconi G., Potiens A. J. Use of plasma reactor to viabilise the volumetric reduction of radioactive wastes. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020. Vol. 168. P. 108625. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108625.
3. Min B. K., Song Y., Choi P.-S., Jung W.-K., Wansuk Ch. Study on the vitrification of mixed radioactive waste by plasma arc melting. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2007, vol. 13, pp. 57–64.
4. Heberlein J., Murphy A. B. Thermal plasma waste treatment. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2008, vol. 41, p. 053001, doi: 10.1088/0022-3727/41/5/053001.
5. Burkhard R., Hoffelner W., Eschenbach R. C. Recycling of metals from waste with thermal plasma. *Resour. Conserv. Recycl.*, 1994, vol. 10, pp. 11–16, doi:10.1016/0921-3449(94)90033-7.
6. Montel J. M. Minerals and design of new waste forms for conditioning nuclear waste - Les minéraux et la formulation de nouvelles matrices de stockage pour les déchets radioactifs. *Comptes Rendus Geosci.*, 2011, vol. 343, pp. 230–236, doi:10.1016/j.crte.2010.11.006.
7. Semerak M., Lys S., Kovalenko T. Analysis of the process of plasma processing of radioactive waste. *Nuclear and Radiation Safety*, 2019, vol. 1(81), pp. 23–29, doi:10.32918/nrs.2019.1(81).04.
8. Kovtun Yu. V., Skibenko Ye. I., Yuferov V. B. Magnetic-Plasma Separation Techniques and Their Use for Spent Fuel and Radioactive Waste Processing. *Nuclear and Radiation Technology*, 2007, vol. 7, no. 1-2, pp. 72–80.
9. Erdogan A. A., Yilmazoglu M. Z. Experimental and numerical investigation of medical waste disposal via plasma gasification. *Applied Energy*, 2024, vol. 353, Part A, p. 122014, doi:10.1016/j.apenergy.2023.122014.
10. Zhang T., Zhang J., Yu Y., Zhang Z., Wang G. Up-rotating plasma gasifier for waste treatment to produce syngas and intensified by carbon dioxide. *Energy*, 2023, vol. 270, p. 126910, doi:10.1016/j.energy.2023.126910.
11. Ma Y., Chu H., Zheng B. Research progress of plasma melting technology in radioactive waste treatment of nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, vol. 198, p. 110307, doi:10.1016/j.anucene.2023.110307.
12. Prado E. S. P., Miranda F. S., Petraconi G., Potiens A. J. Use of plasma reactor to viabilise the volumetric reduction of radioactive wastes. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, vol. 168, p. 108625, doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108625.

References (transliterated)

1. Gonçalves M. F. S., Filho G. Petraconi, Couto A. A., Sobrinho A. S. da Silva, Miranda F. S., Massi M. Evaluation of thermal plasma process for treatment disposal of solid radioactive waste. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 311, p. 114895, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114895.
2. Salihuddin R., Baan R., Zakaria N. & and others. Radioactive Waste Treatment and Conditioning Using Plasma Technology Pilot Plant: Testing and Commissioning. *Research and Development Seminar*, 2016. Available at: <https://inis.iaea.org/records/2qdy4-9xf47> (accessed 02.02.2025).
3. Min B. K., Song Y., Choi P.-S., Jung W.-K., Wansuk Ch. Study on the vitrification of mixed radioactive waste by plasma arc melting. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2007, vol. 13, pp. 57–64.
4. Heberlein J., Murphy A. B. Thermal plasma waste treatment. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2008, vol. 41, p. 053001, doi: 10.1088/0022-3727/41/5/053001.
5. Burkhard R., Hoffelner W., Eschenbach R. C. Recycling of metals from waste with thermal plasma. *Resour. Conserv. Recycl.*, 1994, vol. 10, pp. 11–16, doi:10.1016/0921-3449(94)90033-7.
6. Montel J. M. Minerals and design of new waste forms for conditioning nuclear waste - Les minéraux et la formulation de nouvelles matrices de stockage pour les déchets radioactifs. *Comptes Rendus Geosci.*, 2011, vol. 343, pp. 230–236, doi:10.1016/j.crte.2010.11.006.
7. Semerak M., Lys S., Kovalenko T. Analysis of the process of plasma processing of radioactive waste. *Nuclear and Radiation Safety*, 2019, vol. 1(81), pp. 23–29, doi:10.32918/nrs.2019.1(81).04.
8. Kovtun Yu. V., Skibenko Ye. I., Yuferov V. B. Magnetic-Plasma Separation Techniques and Their Use for Spent Fuel and Radioactive Waste Processing. *Nuclear and Radiation Technology*, 2007, vol. 7, no. 1-2, pp. 72–80.
9. Erdogan A. A., Yilmazoglu M. Z. Experimental and numerical investigation of medical waste disposal via plasma gasification. *Applied Energy*, 2024, vol. 353, Part A, p. 122014, doi:10.1016/j.apenergy.2023.122014.
10. Zhang T., Zhang J., Yu Y., Zhang Z., Wang G. Up-rotating plasma gasifier for waste treatment to produce syngas and intensified by carbon dioxide. *Energy*, 2023, vol. 270, p. 126910, doi:10.1016/j.energy.2023.126910.
11. Ma Y., Chu H., Zheng B. Research progress of plasma melting technology in radioactive waste treatment of nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, vol. 198, p. 110307, doi:10.1016/j.anucene.2023.110307.
12. Prado E. S. P., Miranda F. S., Petraconi G., Potiens A. J. Use of plasma reactor to viabilise the volumetric reduction of radioactive wastes. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, vol. 168, p. 108625, doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108625.

Відомості про авторів (About authors)

Лис Степан Степанович – кандидат технічних наук, доцент; Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; тел.: (032) 258-23-15; ORCID: 0000-0002-7359-1177; e-mail: lysss@ukr.net.

Stepan Lys – Assoc. Prof., Ph.D., Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, Tel. 038 032 258 25 15; ORCID: 0000-0002-7359-1177; e-mail: lysss@ukr.net.

Вашкурар Юрій Зіновійович – кандидат технічних наук, доцент; Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; тел.: (032) 258-23-15; ORCID: 0000-0002-2554-8131; e-mail: yurii.z.vashkurak@lpnu.ua.

Yurii Vashkurak – Assoc. Prof., Ph.D., Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, Tel. 038 032 258 25 15; ORCID: 0000-0002-2554-8131; e-mail: yurii.z.vashkurak@lpnu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лис С. С., Вашкурар Ю. З. Математична модель та чисельне моделювання процесу плазмової переробки радіоактивних відходів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 1 (23). С. 54-61. doi:10.20998/2413-4295.2025.01.07.

Please cite this article as:

Lys S., Vashkurak Y. Mathematical model and numerical simulation of the plasma processing of radioactive waste. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 1(23), pp. 54–61, doi:10.20998/2413-4295.2025.01.07.

*Надійшла (received) 04.02.2025
Прийнята (accepted) 23.03.2025*