

Розробка алгоритму вибору матричного матеріалу для іммобілізації трансуранових елементів на основі модифікованого методу аналізу ієрархій

Розроблено методику вибору матричного матеріалу і методу синтезу матриць для іммобілізації радіоактивних відходів, що вміщують трансуранові елементи, із застосуванням системного підходу. Проведено декомпозицію задачі вибору та оцінки параметрів вибору на різних рівнях ієрархії. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі вибору на основі модифікованого методу аналізу ієрархій. Показано, що використання даного алгоритму при виборі матричного матеріалу надає можливість враховувати як його радіаційно-хімічні та фізико-механічні властивості, так і технологічні параметри методів синтезу матриць, що обумовлює мотивований вибір оптимального матричного матеріалу для іммобілізації радіоактивних відходів, що вміщують трансуранові елементи.

Ключові слова: рідкі радіоактивні відходи об'єкта «Укриття», іммобілізація трансуранових елементів, властивості альтернатив, метод аналізу ієрархій, критерії вибору.

Рідкі радіоактивні відходи (РРВ) накопичуються на всіх етапах зняття Чорнобильської АЕС з експлуатації та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. РРВ характеризуються наявністю продуктів поділу, урану та трансуранових елементів (ТУЕ), що обумовлено взаємодією волуги з паливовмісними масами та іншими радіоактивними матеріалами об'єкта «Укриття». Із досягненням певної концентрації ТУЕ в РРВ об'єкта «Укриття» їх не можна буде переробляти на заводі з переробки рідких радіоактивних відходів. У даний час на ДСП «Чорнобильська АЕС» створюється промислова установка з очищення РРВ об'єкта «Укриття» від ТУЕ і органічних сполук. Технологічний процес такої установки супроводжується утворенням і накопиченням радіоактивних вторинних відходів, класифікованих як середньоактивні довгоіснуючі. Згідно із Законом України «Про поводження з радіоактивними відходами» [1] довгоіснуючі РАВ підлягають захороненню в твердому стані в глибинних геологічних формаціях.

Проблема поводження з вторинними відходами обумовлена не тільки їх накопиченням, а й відсутністю на ДСП «Чорнобильська АЕС» апробованої технології переробки відходів, що містять уран і ТУЕ.

Мета даної роботи полягає у виборі оптимального матричного матеріалу і технології для іммобілізації вторинних відходів, що містять трансуранові елементи. Авторами статті розроблено алгоритм вибору матричного матеріалу з використанням модифікованого методу аналізу ієрархій.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Матричний матеріал для надійної іммобілізації джерел іонізуючого випромінювання має забезпечувати надійну екологічно безпечну ізоляцію трансуранових радіонуклідів протягом тривалого (понад 10^5 років) зберігання. Для цього він повинен мати ряд властивостей [2, 3]:

- термічну стійкість при високому вмісті радіонуклідів;
- механічну міцність та високу теплопровідність;
- малі коефіцієнти теплового розширення та стійкість до радіаційних пошкоджень;
- стійкість по відношенню до процесів фізико-хімічного вивітрювання в умовах тривалого зберігання;
- максимально просту технологічну схему виробництва;
- доступну вихідну сировину.

Перспективними формами іммобілізації трансуранових радіонуклідів з погляду їх подальшого зберігання та захоронення є керамічні матриці. Ще в 50-х роках минулого століття було розроблено серію поліфазної кераміки типу Synroc, яка має високу стійкість завдяки включенню радіонуклідів у кристалічні фази. Проте висока вартість виробництва та вихідної сировини обмежують широке використання цього матеріалу для фіксації радіонуклідів [2].

Автори публікацій [3, 4], вивчаючи властивості кераміки для іммобілізації актиноїдних відходів та методи синтезу матриць, дійшли висновку, що найбільш стабільними і хімічно стійкими фазами з високою ізоморфною ємністю по відношенню до актиноїдів є матриці на основі цирконію, пірохлору, муратаїту, які можуть бути синтезовані за допомогою плавильних технологій.

Автори роботи [5], розглядаючи можливість інкорпорування актиноїдів у мінералоподібну матрицю на основі пірохлору, муратаїту, феритного гранату за допомогою різних способів синтезу, з наведеного переліку мінералоподібних матриць виділили матрицю зі структурою муратаїту. На їх думку, така матриця має виключну стійкість до гідротермального вилугування, а щодо технології виготовлення вони пропонують метод іммобілізації актиноїдів з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу.

Автори роботи [6] вважають, що високу механічну міцність та придатність до подальшої трансмутатії РАВ має цирконієва керамічна матриця, синтезована золь-гель методом.

Роботи [7, 8] присвячені вивченню можливості іммобілізації РАВ у мінералоподібну кераміку за допомогою гарячого ізостатичного пресування.

У роботі [9] встановлено, що одним з матеріалів для іммобілізації РАВ може бути високошільна монофазна цирконова кераміка, отримана методом гарячого пресування у вакуумі.

Як показує аналіз літературних джерел, існує велика кількість мінеральних фаз та методів їх синтезу, спроможних забезпечити надійну екологічно безпечну ізоляцію трансуранових радіонуклідів, але не існує системного підходу до вибору матричних матеріалів з урахуванням технологій виготовлення.

Алгоритмізація процесу аналізу матричних матеріалів. Вибираючи оптимальний матричний матеріал для іммобілізації ТУЕ треба враховувати як властивості матеріалів, так і методи синтезу матриць.

Модель аналізу мінералоподібної кераміки на системному рівні передбачає оперування набором критеріїв її оцінювання. Особливістю даного аналізу є те, що вибрані для аналізу матричні матеріали структурно охоплюють дві підсистеми факторів їх оцінки: 1) радіаційно-хімічні та фізико-механічні параметри; 2) технологічні характеристики виготовлення матриць [3, 10].

Ранжування матричних матеріалів для оцінки їх рівня значущості доцільно, на наш погляд, проводити за допомогою методики аналізу ієрархій [11, 12] виходячи з основних властивостей кераміки та методів синтезу матриць. Використання експертних оцінок для побудови узагальненої матриці попарних порівнянь має враховувати масиви властивостей альтернатив. Цим самим буде досягнуто виконання основних принципів теорії систем — ієрархії, збереження і причинно-наслідкових обмежень [13, 14].

Вхідними умовами до використання методики є:

1) масив альтернатив $X = \{x^1, \dots, x^m\}$: мінералоподібна кераміка — Synroc; ортофосфат цирконію NZP ($\text{NaZr}_2(\text{PO}_4)_3$); цирконоліт ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$); муратаїт ($\text{Na}_2\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{Ti}_7\text{O}_{22}$); пірохлор ($\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$);

методи синтезу матриць — гаряче пресування (ГП); холодне пресування спікання (ХПС); індукційне плавлення холодним тиглем (ІПХТ);

2) для кожної з альтернатив $x^i = \{i_1^i, \dots, i_k^i\}$ визначено масиви властивостей: хімічна стійкість ТУЕ (швидкість вилугування), г/(см²·добу); радіаційна стійкість, α -розпад/м³ [15]; механічна стійкість (границя міцності на стиснення), МПа; фізико-хімічна стабільність при захороненні; максимально можливе завантаження кристалічних фаз актиноїдами, %; ступінь розробки технології; вартість сировини в Україні; якість кінцевого продукту (густина, % теоретичної); продуктивність за кінцевим продуктом, кг/год; температура, °С; тиск, МПа; агрегатний стан відходів, що завантажуються; енергоємність.

Постановка задачі полягає у визначенні вагового критерію для кожного типу мінералоподібної кераміки за допомогою чисельних оцінок її основних властивостей та технологічних параметрів виготовлення матриці. Таким чином, ранжування цінностей альтернатив при побудові системи оптимального вибору за набором властивостей визначається глобальною відносною цінністю W^{pk} , де $i = 1, m$ — номер альтернативи з масиву $X = \{x^1, \dots, x^m\}$; p_k — властивості альтернатив [16].

Декомпозицію та представлення задачі в ієрархічному вигляді наведено на рис. 1.

Ієрархічне представлення задачі визначення найкращого матричного матеріалу для іммобілізації ТУЕ дасть змогу проводити його чисельне оцінювання на основі експертної оцінки та попарного порівняння альтернатив, а також враховувати технологічні параметри методів синтезу матриць. Отже, найкращий матричний матеріал вибиратиметься на основі системного підходу до його аналізу.

Реалізовувати системний підхід до визначення найкращого матричного матеріалу на підставі аналізу його властивостей доцільно за алгоритмом, наведеним на рис. 2.

База даних формується на першому кроці алгоритму на основі переліку матричних матеріалів для іммобілізації РАВ та їх радіаційно-хімічних, фізико-механічних властивостей і методів синтезу матриць.

На наступному кроці за допомогою методики Сааті групою експертів провадиться попарне порівняння властивостей матричних матеріалів та оцінка цінностей альтернатив (локальних ваг) $w^p = \{w^{p1}, \dots, w^{pi}, \dots, w^{pk}\}$. Після цього

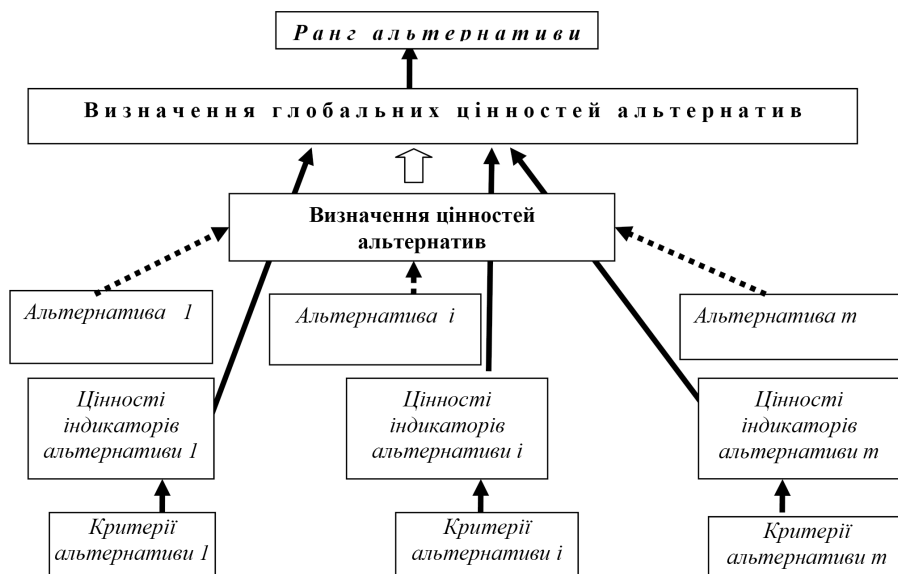


Рис. 1. Декомпозиція розв'язку задачі ранжування альтернатив в ієрархію

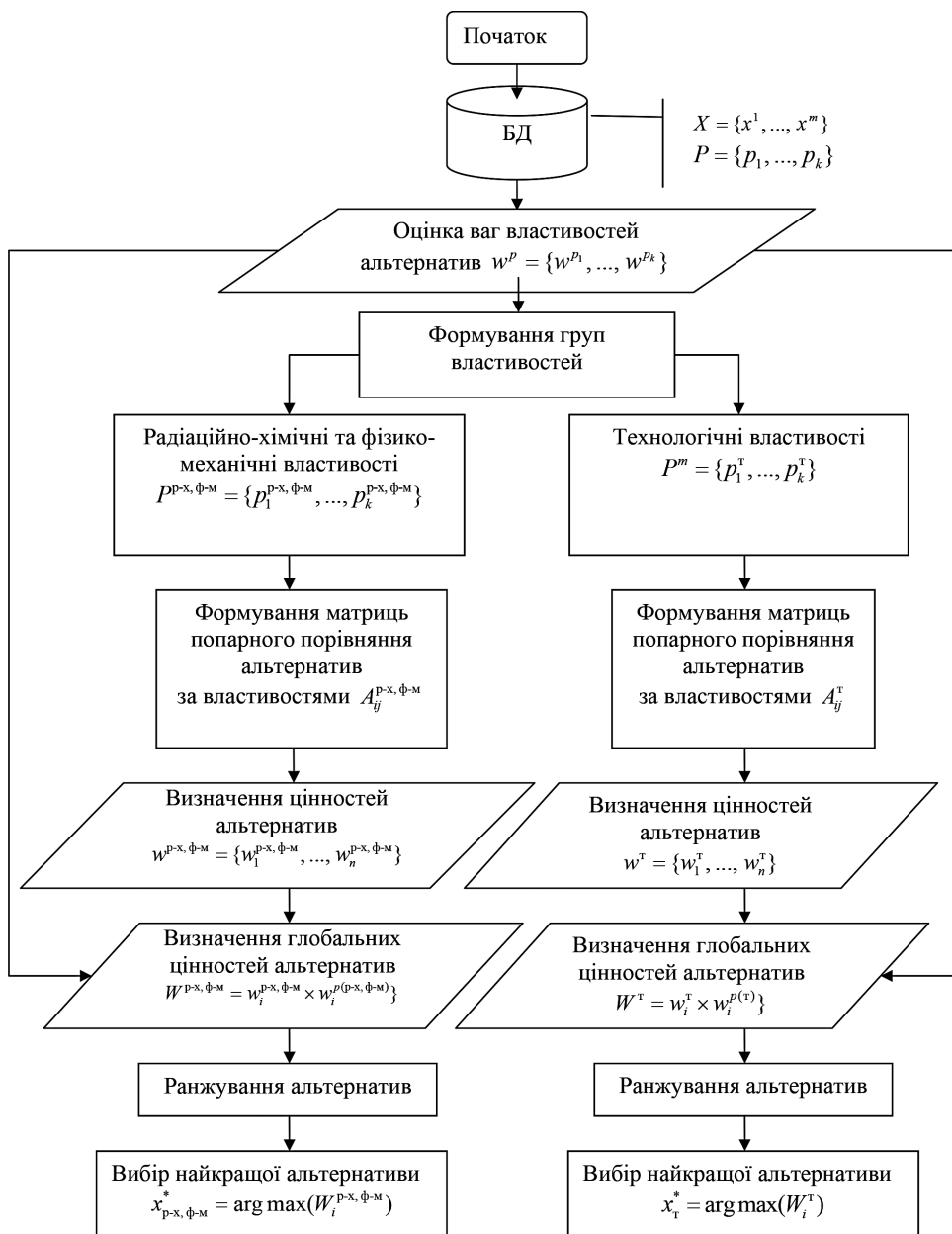


Рис. 2. Алгоритм визначення глобальних цінностей альтернатив за групами властивостей

роблять розпаралелювання алгоритму з метою окремого оцінювання матричних матеріалів $X^{p-x, ф-м}$ за їх радіаційно-хімічними і фізико-механічними властивостями та технологічними параметрами їх виготовлення X^T .

На подальших кроках алгоритму виконують паралельні процедури формування матриць попарного порівняння альтернатив та способів виготовлення, визначення відносних цінностей альтернатив (локальних для кожної гілки алгоритму).

По завершенні етапу оцінювання локальних цінностей, на основі цінностей властивостей $w^p = \{w^{p_1}, \dots, w^{p_k}\}$ за відповідними групами визначають глобальні цінності альтернатив для видів матричних матеріалів та методів синтезу матриць відповідно:

$$W^{p-x, ф-м} = w_i^{p-x, ф-м} \times w_i^{p(p-x, ф-м)}; \quad (1)$$

$$W^T = w_i^T \times w_i^{p(t)}. \quad (2)$$

За результатами визначення глобальних цінностей для кожного матричного матеріалу можна проводити їх ранжування та визначати найкращий за критерієм максимального значення відносної цінності $X^* = \arg \max(W_{p_k}^i)$.

Отримані результати. Реалізація алгоритму визначення найкращого матричного матеріалу та методу синтезу матриць на першому кроці передбачає формування масивів даних для дослідження. Такими масивами є сформовані дані за основними групами властивостей (табл. 1 та 2).

На першому рівні декомпозиції (див. рис. 1) властивості, за якими проводиться оцінювання матричних матеріалів, розділені на дві групи.

Для побудови глобального критерію цінностей альтернатив визначено відносні цінності основних властивостей та сформовано вектор цінностей $w^p = \{w^{p_1}, \dots, w^{p_k}\}$ з визначенням рангів цінностей за критерієм їх максимізації (табл. 3).

Як впливає з табл. 3, експертне оцінювання поділене за двома групами властивостей: радіаційно-хімічними та фізико-механічними (1–7) і технологічними (8–13).

Таблиця 1. Основні властивості мінералоподібної кераміки

Властивості	Мінералоподібна кераміка				
	Synroc	NZP	Цирконоліт	Муратаїт	Пірохлор
Хімічна стійкість ТУЕ, г/(см ² ·добу)	4,0·10 ⁻¹⁰	1,0·10 ⁻⁹	4,8·10 ⁻⁹	2,3·10 ⁻⁹	3,9·10 ⁻⁸
Радіаційна стійкість, α-розпад/м ³	1,0·10 ²⁵	1,0·10 ²⁵	6,0·10 ²⁶	1·10 ²⁵	1,6·10 ²⁵
Механічна стійкість (границя міцності на стиснення), МПа	Висока	Середня	Найвища	Висока	Середня
Фізико-хімічна стабільність при захороненні	Висока	Висока	Найвища	Висока	Висока
Завантаження кристалічних фаз актиноїдами, %	65	30	40	25	60
Ступінь розробки технології	ГП, ХПС, ІПХТ	ГП, ХПС	ХПС, ІПХТ	ІПХТ	ХПС
Вартість сировини в Україні	Висока	Висока	Середня	Висока	Висока

Таблиця 2. Основні параметри технологій виготовлення мінералоподібної кераміки

Параметри	Технології виготовлення		
	ХПС	ГП	ІПХТ
Якість кінцевого продукту (густина, % теоретичної)	95	98	90
Продуктивність за кінцевим продуктом, кг/год	0,5	10	20
Температура плавлення, °С	1000...1300	1000...1300	1500...2000
Тиск, МПа	14...21	14...21	14...40
Агрегатний стан відходів, що завантажуються	Суха	Суха	Суха, волога
Енергоємність	Середня	Висока	Висока

Таблиця 3. Вектор відносних цінностей властивостей матеріалів для глобального критерію

№ п/п	Властивості	Відносні цінності ω	Ранг R
1	Хімічна стійкість ТУЕ, г/(см ² ·добу)	0,240	1
2	Радіаційна стійкість, α-розпад/м ³	0,222	2
3	Механічна стійкість (границя міцності на стиснення), МПа	0,154	3
4	Фізико-хімічна стабільність при захороненні	0,125	4
5	Завантаження кристалічних фаз актиноїдами, %	0,055	5
6	Ступінь розробки технології	0,037	7
7	Вартість сировини в Україні	0,053	6
8	Якість кінцевого продукту (густина від теоретичної, %)	0,030	8
9	Продуктивність за кінцевим продуктом, кг/год	0,017	11
10	Температура плавлення, °С	0,020	10
11	Тиск, МПа	0,021	9
12	Агрегатний стан відходів, що завантажуються	0,012	13
13	Енергоємність	0,015	12

Подальші розрахунки виконано за наведеним на рис. 2 алгоритмом, а також з урахуванням групування рангів цінностей властивостей.

На основі групування властивостей сформовано матриці попарного порівняння альтернатив і проведено чисельне оцінювання цінностей альтернатив з визначенням таких критеріїв:

відносних цінностей альтернатив за властивостями ω_i; власних чисел матриць попарних порівнянь λ_i; індексів узгодженості $I_{\text{розр}} = J_p = \frac{\lambda_{\text{max}} - 1}{m - 1}$.

Аналіз отриманих результатів розрахунків параметрів альтернатив за групою радіаційно-хімічних та фізико-механічних властивостей (рис. 3) показує, що відношення розрахованого індексу узгодженості за матрицею попарних порівнянь та критичного індексу для визначеного числа альтернатив [12] лежить у межах 10 %, а це означає, що попарні порівняння альтернатив проведено узгоджено і відносним цінностям альтернатив можна довіряти.

Таким чином, за максимумами відносних цінностей найкращими матричними матеріалами є Synroc та цирконоліт.

Аналогічні розрахунки проведено за характеристиками методів синтезу матриць. Результати розрахунків (рис. 4) можна вважати коректними за відношенням розрахованих та критичних індексів узгодженості. За максимумами відносних цінностей найкращими методами синтезу матриць є методи холодного спікання, пресування та гарячого пресування.

На наступному кроці алгоритму визначено глобальний критерій цінностей альтернатив з урахуванням

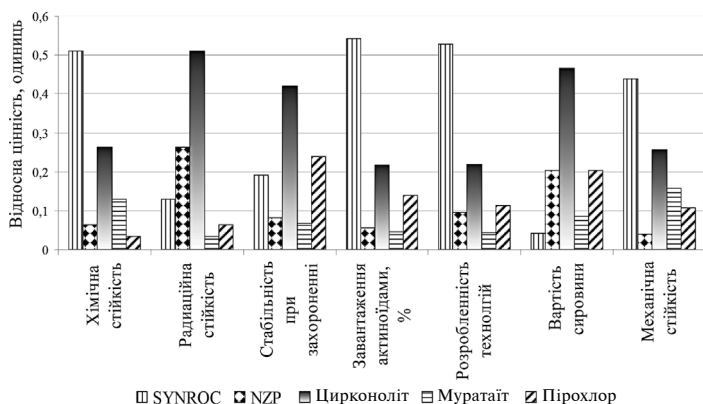


Рис. 3. Відносні цінності альтернатив вибору матеріалів за їх радіаційно-хімічними та фізико-механічними властивостями

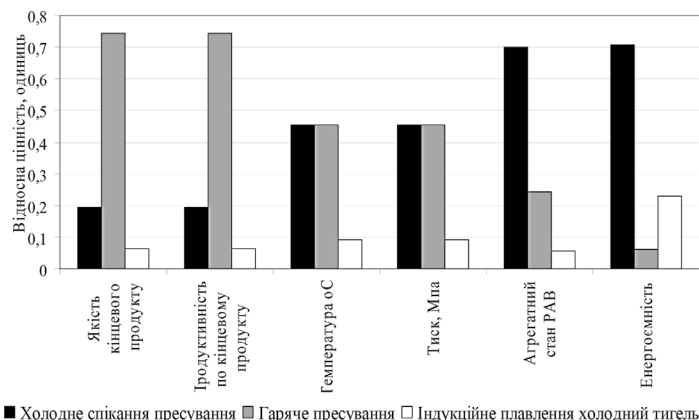


Рис. 4. Відносні цінності альтернатив вибору матеріалів за технологічними властивостями

Таблиця 4. Матриця глобальних пріоритетів (цінностей альтернатив) за групою радіаційно-хімічних і фізико-механічних властивостей матричного матеріалу

Тип кераміки	Група властивостей (цінність)							Глобальна цінність альтернатив $W^{P-X, \Phi-M}$
	1 (0,240)	2 (0,222)	3 (0,154)	4 (0,125)	5 (0,055)	6 (0,037)	7 (0,053)	
Synroc	0,510	0,130	0,191	0,543	0,528	0,042	0,439	0,3021
N2P	0,064	0,264	0,081	0,055	0,096	0,203	0,040	0,1082
Цирконоліт	0,264	0,510	0,421	0,218	0,219	0,466	0,258	0,3116
Муратаїт	0,130	0,033	0,068	0,045	0,045	0,086	0,157	0,0683
Пірохлор	0,033	0,064	0,240	0,139	0,113	0,203	0,107	0,0957
SYNROC	0,510	0,130	0,191	0,543	0,528	0,042	0,439	0,3021

Таблиця 5. Матриця глобальних пріоритетів (цінностей альтернатив) за групою технологічних властивостей

Метод синтезу матриць	Група властивостей (цінність)						Глобальна цінність альтернатив W^T
	8 (0,030)	9 (0,017)	10 (0,020)	11 (0,021)	12 (0,012)	13 (0,015)	
ХПС	0,194	0,194	0,455	0,455	0,701	0,709	0,0461
ГП	0,743	0,743	0,455	0,455	0,243	0,060	0,0573
ПХТ	0,063	0,063	0,091	0,091	0,056	0,231	0,0107

локальних цінностей властивостей, визначених на початковому етапі: радіаційно-хімічних, фізико-механічних $W^{P-X, \Phi-M} = \{w_i^{P-X, \Phi-M} \times w_i^{P(X, \Phi-M)}\}$ та технологічних $W^T = \{w_i^T \times w_i^{P(T)}\}$. Глобальні цінності альтернатив, установлені за формулами (1) та (2), наведено в табл. 4 та 5 відповідно.

Аналіз отриманих результатів показує, що за критерієм максимізації глобальної цінності найкращим матричним матеріалом для іммобілізації трансуранових елементів

є цирконоліт, а найкращим методом синтезу матриць — технологія гарячого пресування.

Цирконоліт володіє високими показниками якості: швидкість вилюговування за ТУЕ — $4,8 \cdot 10^{-9}$ г/(см²·добу); радіаційна стійкість — $6,0 \cdot 10^{26}$ α-розпад/м³; завантаження кристалічних фаз актиноїдами — 40 %; сировина — одна з найдоступніших в Україні.

Технологія гарячого пресування гарантує отримання високих фізико-хімічних властивостей матеріалів матриць — досягнення їх максимальної щільності (99 % теоретичної).

Висновки

Отримані дані щодо модифікації методу аналізу ієрархій для оцінки матричного матеріалу на основі системи показників властивостей матеріалів та технологічних характеристик дають підстави стверджувати, що: 1) реалізовано системний підхід до визначення значущих параметрів властивостей матеріалів та технологій їх виготовлення; 2) досягнуто мету дослідження — розроблено модель і модифіковано метод аналізу ієрархій для оптимального вибору матричного матеріалу та технологій виготовлення.

Особливістю дослідження є різнокритеріальність: оцінка матричних матеріалів та методів синтезу матриць проводиться згідно з їх радіаційно-хімічними, фізико-механічними та технологічними параметрами, які можуть формуватися відповідно до експертного оцінювання по кожній задачі окремо.

Запропонована методика дає змогу, незважаючи на достатньо велику розмірність масиву факторів у межах заданого матеріалу чи технології, проводити коректні попарні порівняння з досягненням заданого рівня узгодженості та визначення відносних цінностей альтернатив, яким можна довіряти.

Проведено ранжування альтернатив за допомогою методики аналізу ієрархій для оцінки їх рівня значущості з урахуванням особливостей формування альтернатив за їх радіаційно-хімічними, фізико-механічними властивостями та технологічними характеристиками.

Виконано завдання дослідження:

1. Реалізовано системний підхід до вивчення проблеми та проведено декомпозицію розв'язку задачі ранжування альтернатив в ієрархію.

2. Модифіковано метод аналізу ієрархій шляхом формування узгоджених матриць попарних порівнянь властивостей груп альтернатив та визначення на їх основі глобальної критерію цінностей.

Пропонована методика може бути використана на ДСП «Чорнобильська АЕС» при виборі оптимального матричного матеріалу та технології виготовлення матриць для іммобілізації вторинних відходів, що утворюватимуться в процесі роботи промислової установки з очищення РРВ об'єкта «Укриття» від ТУЕ і органічних сполук.

Список використаної літератури

1. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами». Ред. від 01.01.2018. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/255/95-%D0%B2%D1%80>
2. Верещагина Т. А., Васильева Н. Г., Аншиц А. Г. Геологический подход к выбору минералоподобных матриц-фиксаторов радионуклидов для долговременного захоронения в гранитоидах (обзор). *Химия в интересах устойчивого развития*. 2008. Вып. 16. С. 69–383.
3. Стефановский С. В., Куляко Ю. М., Юдинцев С. В., Очкин А. В., Ровный С. И. Керамика для иммобилизации актиноидных отходов. *Вопросы радиационной безопасности*. 2002. Вып. 1. С. 15–27.
4. Стефановский С. В., Пташкин А. Г., Князев О. А., Зеньковская М. С., Стефановская О. И., Варлакова Г. А., Бурлака О. А., Юдинцев С. В., Никонов Б. С. Иммобилизация имитатора актиноидно-редкоземельной фракции высокоактивных отходов в матрицу на основе мураита методом индукционного плавления в холодном тигле. *Физика и химия обработки материалов*. 2008. Вып. 4. С. 60–71.
5. Перевалов С. А. Инкорпорирование актиноидов в минералоподобные матрицы. *Российский химический журнал*. 2005. Вып. 2. С. 107–114.

6. Головин Ю. И., Кузнецов Д. Г., Васюков В. М., Шуклинов А. В., Коренков В. В., Григорьев И. П., Столяров А. А. Композиты на основе оксида циркония и их применение для иммобилизации радиоактивных отходов. *Вестник Томского гос. ун-та*. 2013. Вып. 6. С. 3150–3155.

7. Саенко С. Ю. Изоляция радиоактивных отходов с использованием горячего изостатического прессования. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2015. Вип. 1 (65). С. 41–48.

8. Саенко С. Ю., Ажажа Ж. С., Холомеев Г. А., Пилипенко А. В., Габелков С. В., Тарасов Р. В. Капсулирование горячим изостатическим прессованием поврежденных твело: технологический подход и макетные эксперименты. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2009. Вип. 3. С. 36–39.

9. Саенко С. Ю., Шкуропатенко В. А., Тарасов Р. В., Сурков А. Е., Савина С. А., Миронова А. Г., Прудывус Е. А., Питак Я. Н. Получение высокоплотной цирконовой керамики. *Зб. наук. праць ВАТ «Український наук.-досл. ін-т вогнетривів імені А. С. Бережного»*. 2013. Вип. 113. С. 46–52.

10. Бекман И. Н. Ядерная индустрия. Курс лекций. Лекция 23 : Конечная стадия ядерного топливного цикла. М., 2005. С. 1–26.

11. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.

12. Скітер І. С., Ткаленко Н. В., Трунова О. В. Математичні методи прийняття управлінських рішень : Навч. посібник. Чернівці : ЧДІЕУ, 2011. 240 с.

13. Катренко А. В. Системний аналіз : Підручник. Львів : Новий Світ, 2011. 396 с.

14. Лямец В. И., Тевяшев А. Д. Системный анализ. Харьков : ХТУРЕ, 1998. С. 252.

15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности : НП-019–2000. URL: <https://www.seogan.ru/np-019-2000-sbor-pererabotka-khraneniye-i-kondicionirovanie-zhidkix-radioaktivnix-otkhodov-trebovaniya-bezopasnosti.html>

16. Маргасов Д. В., Сахно Є. Ю., Скітер І. С. Розробка моделі та модифікація методу аналізу ієрархій для оцінки рівня енергоефективності. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Вып. 5(77). С. 26–32.

References

1. Law of Ukraine “On Management of Radioactive Waste”. Document 255/95 Ed. 2018 [Zakon Ukrainy “Pro povodjennya z radioaktivnymy vidhodamy”]. Dokument 255/95-vr. Red. 2018r.
2. Vereshchagina, T.A., Vasil'eva, N.G., Anshits, A.G. (2008), “Geological approach to the selection of mineral-like matrix-fixators for radionuclides for long-term burial in granitoids (review)” [“Geologicheskij podhod k vyboru mineralopodobnyh matric-fiksatorov radionuklidov dlya dolgovremennogo zahoroneniya v granitoidah (obzor)”], *Chemistry for Sustainable Development*, pp. 369–383
3. Stefanovsky, S.V., Kulyako, Yu.M., Yudinsev, S.V. Ochkin, A.V. Rovny S.I. (2002) “Ceramics for the immobilization of actinide waste” [“Keramika dlya immobilizatsii aktinoidnyh otkhodov”], *Radiation Safety Issues*, pp. 15–27
4. Stefanovsky, S.V., Ptashkin, A.G., Knyazev, O.A., Zenkovskaya, M.S., Stefanovskaya, O.I., Varlakova, G.A., Burlaka, O.A., Yudinsev, S.V., Nikonov, B.S. (2008), “Immobilization of the simulator of the actinide-rare-earth fraction of high-level waste in a matrix based on the murait by the method of induction melting in a cold crucible” [“Immobilizatsiya imitatora aktinoidno-redkozemelnoy fraktsii vysokoaktivnyh otkhodov v matritsu na osnove muraitaia metodom induktsionnogo plavlenniya v holodnom tigle”], *Physics and chemistry of materials processing*, pp. 60–71
5. Perevalov, S.A. (2005) “Incorporation of actinides into mineral-like matrices” [“Inkorporirovanie aktinoidov v mineralopodobnye matritsy”], *Russian Chemical Journal*, pp. 107–114.
6. Golovin, Y.I., Kuznetsov, D.G., Vasyukov, V.M., Shuklinov, A.V., Korenkov, V.V., Grigoriev, I.P., Stolyarov, A.A. (2013), “Composites based on zirconium oxide and their application for the immobilization

of radioactive waste” [“Kompozity na osnove oksida tserkoniya”], Bulletin of TSU, pp. 3150–3155.

7. Sayenko, S.Yu. (2015) “Isolation of radioactive waste using hot isostatic pressing” [“Izolyatsiya radioaktivnyh othodov s ispolzovaniem goryachego izostaticeskogo presovaniya”], Nuclear and radiation safety, pp. 41–48.

8. Sayenko, S.Yu., Azhana, Zh.S., Kholomeev, GA, Pilipenko, A.V., Gabelkov, S.V., Tatasov, R.V. (2009), “Encapsulation by hot isostatic pressing of damaged twigs: technological hike and mock experiments” [“Kapsulirovanie goryachim izostaticeskim pressovaniem povregdennyh tvelov: tehnologicheskii podhod I maketnye eksperimenty”], Nuclear and radiation safety, pp. 36–39.

9. Sayenko, S.Yu., Shkuropatenko, V.A., Tarasov, R.V., Surkov, A.E., Savina, S.A., Mironova, A.G., Prudyvus, E.A. Pitac, Ya.N. (2013), “Production of high-density zirconia ceramics” [“Poluchenie vysokoplotnoy tsyrkonovoy keramiki”], Collection of scientific works of PJSC UKRNDI VOGNETRIV IM A.S. BREEDING, pp. 46–52.

10. Beckman, I.N. (2005), “The final stage of the nuclear fuel cycle” [Konechnaya stadiya yadernogo toplivnogo tsykla], Nuclear industry, pp. 1–26.

11. Saati, T. (1993), Making decisions. Method of Analyzing Hierarchies. Trans. from Eng. [Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarhiy. Per. s angl.], M.: Radio and Communications, Moscow, 278 p.

12. Skiter, I.S., Tkalenko, N.V., Trunova, O.V. (2011), Mathematical methods of making managerial decisions [Matematychni metody pryynyattya rishen], Tutorial- Chernigov, 240 p.

13. Katrenko, A.V. (2011), System Analysis [Systemnyy analiz], New World, Lviv, 396 p.

14. Lyametz, V. I., Tevyashev, A. D. (1998), System analysis [Systemnyy analiz], Kharkiv, 252 p.

15. Collection, processing, storage and conditioning of liquid radioactive waste. [Sbor, pererabotka, hranenie i konditsionirovanie gidkikh radioaktivnyh othodov, NP 019 2000], Security requirement, 2009, 1–16 pp.

16. Margasov, D.V., Sakhno, E.Yu., Skiter, I.S. (2015), “Model development and modification of hierarchy analysis method for energy efficiency assessment” [“Rozrobka modeli ta modyfikatsiya metodu analizu ierarhiy dlya otsinky rivnya energoefektyvnosti”], East European Magazine of Advanced Technology, pp. 26–32.

бора на разных уровнях иерархии. Предложен алгоритм решения задачи выбора на основе модифицированного метода анализа иерархий. Показано, что использование данного алгоритма при выборе матричного материала дает возможность учитывать как его радиационно-химические и физико-механические свойства, так и технологические параметры методов синтеза матриц, что обуславливает мотивированный выбор оптимального матричного материала для иммобилизации радиоактивных отходов, содержащих трансурановые элементы.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы объекта «Укрытие», иммобилизация трансурановых элементов, свойства альтернатив, метод анализа иерархий, критерии выбора.

Skiter, E. Vtornikova, E.

Development of the matrix material selection algorithm for immobilization of transurane elements using the modified method of analysis of hierarchies

The technique was developed for the material choice by matrix manufacturing techniques for storage of radioactive waste. Systems approach was used for realization of a technique. Tasks decomposition was realized for assessment of parameters for different levels of hierarchy. The algorithm was developed the modified method of a nanaliz of hierarchies. The method is used for determination of global value of an alternative which considers the value of properties of alternatives. The method allows to make the motivated choice of an alternative which considers properties. The best alternative on manufacturing techniques is hot pressing. The best material is SYNROC and zirconolith.

Keywords: properties of alternatives, global value of an altarnetiva, method of the analysis of hierarchies, index of coherence, criteria of the choice

И. С. Скитер, Е. Вторнікова

Разработка алгоритма выбора матричного материала для иммобилизации трансурановых элементов на основе модифицированного метода анализа иерархий

Разработана методика выбора матричного материала и метода синтеза матриц для иммобилизации радиоактивных отходов, содержащих трансурановые элементы, с применением системного подхода. Проведена декомпозиция задачи выбора и оценки параметров вы-

Получено 02.01.2018.