

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Онисимчук Тетяна Михайлівна

УДК 621.039.77

**ТРАНСМУТАЦІЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ З
УДОСКОНАЛЕННЯМ СИСТЕМИ СПОВІЛЬНЕННЯ ШВИДКИХ
НЕЙТРОНІВ**

Спеціальність 101 – «Екологія»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття магістерського наукового ступеня
за освітньо-професійною програмою

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі інженерної екології Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, старший викладач
Тверда Оксана Ярославівна,
Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського”, старший викладач кафедри
інженерної екології

Захист дисертації відбудеться „___” _____ 20__ року о ___— годині на засіданні спеціалізованої вченої ради _____._____ в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, ауд. 201.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий „___” _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підкритичні системи, керовані зовнішнім джерелом нейтронів існують лише на етапі досліdnих експериментальних установок, тому вони зазнають суттєвих модифікацій в цілях впровадження нехарактерних для промислових реакторів систем забезпечення технологічного процесу. Для успішної трансмутації відходів необхідно забезпечити сповільнення швидких нейтронів, що генеруються зовнішнім джерелом нейтронів. Енергія, з якою рухається нейтрон, є визначальним чинником впливу на результат взаємодії: швидкі нейтрони, що мають енергією більше 0,1 MeV, характеризуються меншим показником перерізу поділу в порівнянні із тепловими нейтронами, енергія яких близька до середньої енергії броунівського руху молекул газу при кімнатній температурі та становить 0,025 eV.

Необхідність змінювати енергію нейтрона підтверджується даними експериментальних досліджень, де чітко видно, що тепловий нейтронний спектр набагато вигідніший для трансмутації цих ізотопів ніж швидкий. Причиною цього являється те, що, при тепловому спектрі нейтронів спостерігається більший переріз взаємодії як ділення так і радіаційного захоплення, що одночасно викликає два механізми трансмутації ВЯП: реакцію поглинання з утворенням короткоживучого або стабільного ядра та реакцію поділу.

Необхідною умовою для трансмутації є достатньо висока густина потоку нейтронів у реакторі. Для виконання цієї умови використовують прискорювачі, де відбувається реакція з виникненням 14 MeV нейтронів. Оскільки дана енергія зavelика для взаємодії з паливом, існує необхідність сповільнення нейтронів, тобто зменшення їх кінетичної енергії при переміщенні всередині активної зони. Оскільки конструкційні особливості підкритичних реакторів унеможливають використання традиційних сповільнювачів, потрібно дослідити матеріали, які забезпечуватимуть сповільнення та ефективність роботи підкритичних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Актуальність даного дослідження обумовлене завданнями Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», зокрема створенням на загальнодержавному рівні основ для розбудови системи утилізації відходів паливно-енергетичного комплексу, забезпечення впровадження новітніх технологій та обміну інформацією щодо утилізації радіоактивних відходів та ін..

Метою роботи є виявлення можливості застосування пластикового сповільнювача в підкритичних ядерних установках, керованих зовнішнім джерелом нейтронів та встановлення залежності забруднення повітря радіоактивними речовинами від товщини зовнішнього шару сповільнювача після циклічних процесів переробки.

Об'єкт дослідження – трансмутація радіоактивних відходів у підкритичних системах із пластиковим сповільнювачем.

Предмет дослідження – показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиковим сповільнювачем.

Методи дослідження. В роботі використані загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних та експериментальних досліджень; методи математичної та статистичної обробки даних для моделювання досліджуваних параметрів; методи обчислювальної техніки при проведенні трудомістких розрахунків; методи математичного моделювання для визначення оптимальних характеристик досліджуваних систем та комп'ютерного моделювання для візуалізації отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

В роботі вперше визначено показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиком сповільнювачем, доведено можливість застосування вторинного полімеру в якості сповільнювача швидких нейтронів та встановлено залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від циклу переробки матеріалу захисного шару.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень доцільно застосовувати при проектуванні дослідних та експериментальних підкритичних ядерних установок із значним збереженням матеріальних ресурсів за рахунок заміни традиційного сповільнювача.

Апробація результатів дисертації. Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на I Науково-технічній конференції магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів (м. Київ, 21.11.2018 р.).

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано статтю у матеріалах I Науково-технічної конференції магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, 1 додатку, списку використаних джерел, який містить 59 найменувань. Основний текст викладено на 99 сторінок, в них 30 рисунка та 40 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, наведено методи проведення дослідження, показано наукову новизну і практичну значення одержаних результатів, представлено дані з апробації результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано умови, що необхідні для здійснення трансмутації радіоактивних відходів реакторів АЕС. Показано, що необхідно забезпечити сповільнення швидких нейтронів, що генеруються зовнішнім джерелом нейтронів. Оскільки енергія, з якою рухається нейтрон, є визначальним чинником впливу на результат взаємодії: швидкі нейтрони, що мають енергією більше 0,1 MeV, характеризуються меншим показником перерізу поділу в порівнянні із тепловими

нейтронами, енергія яких близька до середньої енергії броунівського руху молекул газу при кімнатній температурі та становить 0,025 eV.

Необхідною умовою для трансмутації є достатньо висока густина потоку нейтронів у реакторі. Для виконання цієї умови використовують прискорювачі, де відбувається реакція з виникненням 14 MeV нейтронів. Оскільки дана енергія занадто велика для взаємодії з паливом, існує необхідність сповільнення нейтронів, тобто зменшення їх кінетичної енергії при переміщенні всередині активної зони.

Традиційні сповільнювачі володіють рядом характеристик, що унеможливають їх використання у пропонованій підкритичній системі. Основними недоліками води є:

- високий коефіцієнт розчинності сумішей, зокрема солей, в результаті чого відкладаючись на теплопередаючих поверхнях, осад приводить до погіршення теплообміну, що викликає перегрівання оболонок тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ);

- низька температура кипіння, що зумовлює необхідність підвищення тиску у першому контурі;

- поглинання теплових нейтронів з утворенням дейтерію, що у промислових реакторах компенсують застосуванням ядерного палива на основі збагаченого урану.

Основними недоліками графіту є:

- висока вартість матеріалу (>10 дол/кг), що зумовлена складністю та енергоємністю технології отримання реакторного графіту з суміші нафтового коксу і кам'яновугільної смоли;

- необхідність утримування графіту в енергетичних реакторах в атмосфері інертних газів (зазвичай, охолоджена графітоазотно-гелієва суміш), що дозволяє підняти температуру горіння графіту від 400 °C до 650 °C;

- структурна зміна кристалічної решітки матеріалу при опроміненні в ядерному реакторі під дією швидких нейтронів (відбувається зсув атомів вуглецю із вузлів решітки), що пришвидшує фізичний знос обладнання.

Оскільки конструкційні особливості підкритичних реакторів унеможливають використання традиційних сповільнювачів, потрібно дослідити матеріали, які забезпечуватимуть сповільнення та ефективність роботи підкритичних систем.

Застосування пластику широко поширене у сфері реєстрації потоків нейтронів та гама-випромінювання. Вивчення напрацювань попередників дозволило виявити моделі із застосуванням пластикового сповільнювача у підкритичних ядерних установках. Сповільнююча здатність пластику була застосована при розробці блоку детектування нейтронного випромінювання БДПН-08. Система призначена для виявлення джерел нейтронного випромінювання та вимірювання щільності потоку швидких та теплових нейтронів. В Об'єднаному інституті енергетичних і ядерних досліджень – Сосни НАН Білорусі в 2000 р. була введена в експлуатацію підкритична уран-поліетиленова збірка, керована генератором нейтронів для вивчення нейтронно-фізичних характеристик ADS. У 2005 році була

введена в експлуатацію швидко-теплова підкритична збірка, керована генератором нейтронів. До ядерно-фізичного стенду «ЯЛІНА» входять дві підкритичні збірки – «Яліна-Теплова» та «Яліна-Бустер».

Таким чином, практичний досвід застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів досить поширений. Однак практично недослідженою залишається можливість оптимізації підкритичних ядерних реакторів з точки зору застосування в якості сповільнювача синтетичних або природних полімерів, що піддавалися методам утилізації.

У другому розділі визначено основні параметрами, що впливають на роботу підкритичної ядерної установки:

- тип теплоносія, що циркулює у технологічних контурах реакторної установки;
- тип полімеру, з якого виготовлено сповільнювач швидких нейтронів;
- геометричні розміри підкритичного реактора.

Для визначення оптимальних параметрів роботи підкритичного реактора необхідно провести розрахунковий аналіз можливості створення самопідтримуючої ланцюгової реакції поділу ядер урану у відпрацьованих збірках, здійснено математичне та комп'ютерне моделювання процесів, що визначають доцільність застосування підкритичної ядерної установки у промислових цілях.

Для розрахунку моделі еталонного підкритичного реактора із зовнішнім джерелом нейтронів було визначено типи полімеру, що можуть застосовуватись в якості сповільнювача. Методом ієрархій за Т. Сааті проведено порівняльний аналіз серед наступних груп полімерів: поліетилентерефталат (ПЕТФ), поліетилен низького тиску або високої густини (ПНТ), поліпропілен (ПП) та полістирол (ПС). Дані для розрахунку наведено в табл. 2.1.

Таблиця 1 – Характеристики матеріалів сповільнювачів

№ п/п	Матеріал	Показник			
		Температура плавлення, °C	Міцність на розтяг, МПа	Коефіцієнт теплового розширення, град-1	Теплопровідність, Вт/(м·К).
1	Полістирол	102	160	0,000022	0,2
2	ПЕТФ	255	200	0,000655	0,14
3	Поліпропілен	165	172	0,0003	0,22
4	ПНД	170	350	0,0000045	0,09

Для кожного критерія оцінки (P) призначено характеристику (H). За бальною системою оцінювалась важливість кожної характеристики для усіх критеріїв оцінки. Бали, що визначають ступінь важливості показника присвоювались у відповідності до величин економічних витрат, які передбачаються із масштабів аварійних ситуацій, що виникають при нехтуванні кожною

характеристикою. Наближена вартість заміни деформованих конструкцій наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Вартість заміни деформованих конструкцій

Фактор впливу	Наслідок	Заходи по усуненню	Вартість заходів
Темпера-тура плавлення	Розплавлення сповільнювача, втрата геометрії активної зони, зменшення прохідного перерізу теплоносія, погіршення охолодження ТВЕЛів, їх розігрів з подальшим плавленням, вихід радіоактивностей за межі технологічного контуру	Позапланова аварійна зупинка реактора, виведення його з експлуатації, ліквідація наслідків техногенної аварії	близько 8 млрд \$
Міцність на розтяг	Втрата герметичності активної зони, вихід високоактивного теплоносія за межі технологічного контуру	Проведення робіт по знезараженню забруднених елементів конструкції, здійснення ремонтних робіт по усуненню дефектів	близько 2,3 млрд \$
Коефіцієнт теплового розшире-ння	Збільшення розмірів активної зони, збільшення навантаження на кріпильні елементи, їх пошкодження	Заміна кріпильних елементів	близько 3,6 млн \$
Теплопровідніс-ть	Збільшення втрат корисної теплоти в оточуюче середовище	Теплоізоляція оболонки реактора	близько 57 000 \$

Таким чином, встановлено, що найбільш важливим показником, якому присвоєно найвищий бал є температура плавлення сповільнювача.

За результатами розрахунку значення ступеня важливості кожного матеріалу становлять: $N_1 = 0,0975$; $N_2 = 0,2387$; $N_3 = 0,1125$; $N_4 = 0,5513$.

Результати аналізу методом ієрархії вказують на ефективність застосування в якості сповільнювача швидких нейтронів поліетилену низького тиску. Важливо врахувати також коефіцієнт сповільнення нейтронів кожної речовини. Результати визначення даного показника вказано на рис.1.

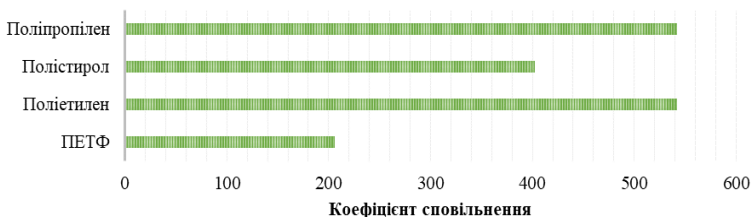


Рисунок 1 – Величина коефіцієнту сповільнення для оцінюваних матеріалів

Як видно із графіку, показники сповільнення для поліпропілену та поліетилену низького тиску практично однакові, однак аналіз методом ієрархії

дозволяє обрати для моделювання підкритичного реактору раціональний матеріал – ПНТ.

Вибір типу теплоносія полягає у визначенні такого типу теплоносія, що буде володіти наступними специфічними характеристиками: низькою корозійною агресивністю до матеріалів, що використовуються у реакторах, високою теплоємністю, високою теплопровідністю, малою в'язкістю, високою температурою кипіння або низькою температурою плавлення (для рідкометалевих теплоносіїв), високою термостійкістю, високою радіаційною стійкістю, малим перерізом поглинання нейтронів, малою наведеною радіоактивністю, пожежовибухобезпечністю, негорючістю та не токсичністю.

Використавши інструмент Пошук розв'язку табличного процесора Excel в задачах лінійного програмування проаналізовано типи теплоносіїв, що застосовуються у вітчизняних АЕС за характеристиками в табл.3.

Таблиця 3– Вихідні параметрами для розрахунку

Теплоносій	Показники		
	Температура плавлення теплоносія, $T_{пл}^{тп}$ (К)	Температура плавлення сповільнювача, $T_{пл}^{сп}$ (К)	Переріз поглинання теплових нейтронів за н.у., $см^{-1}$
Легка вода	273	407	0,66419
Важка вода	276,8		0,00696
Рідкий натрій	370,8		0,0052
Сплав свинцю та вісмуту	398		0,08054
Гелій	0,8		0,075

Побудова математичної моделі.

1. Введено такі позначення змінних: X_{ij} — j -тий показник i -го сповільнювача, $i = 1,2,3,4,5$; $j = 1,2,3$.

2. Визначено макроскопічний переріз поглинання теплових нейтронів при робочій температурі в реакторі, $см^{-1}$:

$$\Sigma_a^t = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_p}} \cdot \Sigma_a, \quad (1)$$

де T – температура за нормальних умов, 293 К;

T_p – робоча температура, К [34].

3. Цільова функція має вигляд: $f(x) = \Sigma_a^t \rightarrow \min$.

4. Система обмежень з умов поставленої задачі:

а) максимальна робоча температура теплоносія всередині реактора не повинна перевищувати температуру плавлення сповільнювача з урахуванням запасу в 25°С:

$$T_p < T_{nl}^{cn} - 25^{\circ}\text{C}; \quad (2)$$

б) мінімальна робоча температура теплоносія всередині реактора повинна перевищувати температуру плавлення теплоносія з урахуванням запасу в 15°C :

$$T_p < T_{nl}^{mn} + 15^{\circ}\text{C}; \quad (3)$$

в) переріз поглинання теплових нейтронів при робочій температурі в реакторі не може бути від'ємним:

$$\Sigma_a^t \geq 0. \quad (4)$$

Через «Пошук рішення» визначено оптимальний розв'язок поставленої задачі:

- для легкої води отримано чисельне значення 0,58;
- для важкої води отримано чисельне значення 0,006;
- для рідкого натрію отримано чисельне значення 0,0053.
- для сплаву свинцю та вісмуту отримано чисельне значення 0,0847.
- для гелію отримано чисельне значення 0,0154.

Таким чином, для підкритичного реактора, керованого зовнішнім джерелом нейтронів в якості сповільнювача доцільно застосовувати рідкий натрій.

У програмному комплексі WIMS (Winfrith Improved Multigroup Scheme) проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора з пластиковим сповільнювачем, визначено ядерні концентрації ізотопів, що містяться у ВЯП, встановлено залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору. Визначено, що найкращій ефективності проектованого реактору відповідає крок розташування технологічних каналів 276 мм.

В розділі також виконується повірковий теплогідравлічний розрахунок, задачею якого є визначення основних теплотехнічних параметрів при відомому конструктивному оформленні реактору та заданій потужності енерговиділення ВЯП. Для розрахунку використовується тривимірний CFD (Computational Fluid Dynamics) код, що базуються на рішенні усереднених рівнянь Нав'є-Стокса у формі Рейнольдса (RANS), а саме програмний комплекс Fluent в середовищі Ansys WorkBanch.

Визначено основні показники безпеки функціонування підкритичного реактору з пластиковим сповільнювачем, а саме: розподіл температури, теплового поля, полів напружень, що виникають при нагріванні пластикових елементів у реакторі. На рис. 2 та рис. 3 наведено розподіл температури теплоносія на виході з ТВЗ та за об'ємом пластикового сповільнювача у реакторі, на рис. 4. наведено моделювання розподілу полів теплового потоку в поліетиленовому сповільнювачі.

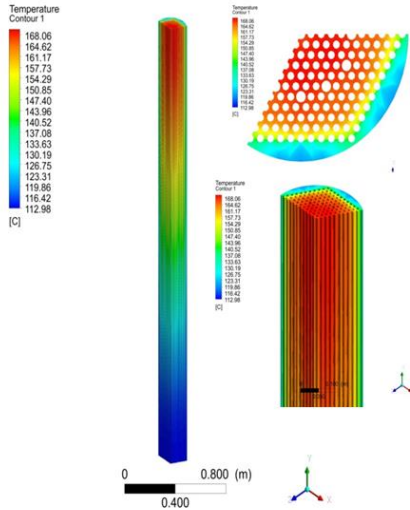


Рисунок 2 – Розподіл температури за об'ємом ТВЗ

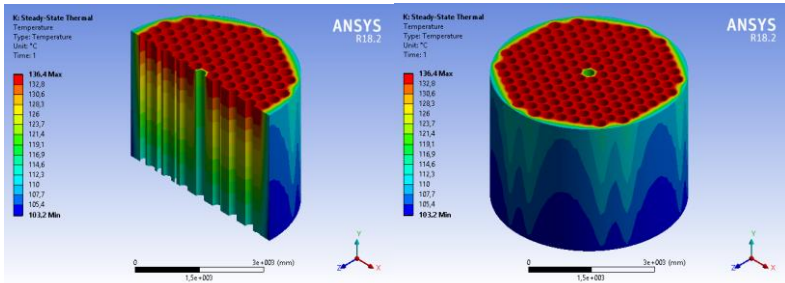


Рисунок 3 – Розподіл температури за об'ємом пластикового сповільнювача

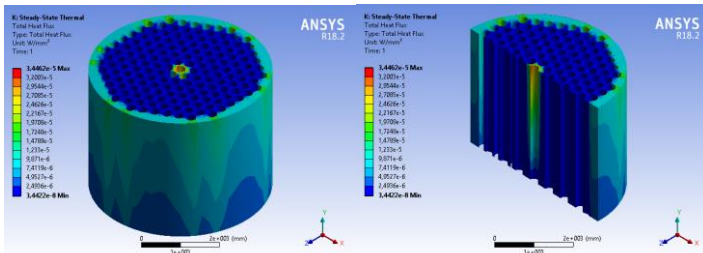


Рисунок 4 – Розподіл теплового потоку за об'ємом пластикового сповільнювача

Встановлені основні локації можливих деформацій, результати моделювання свідчать про можливість застосування синтетичних полімерів в якості сповільнювачів у підкритичних системах (рис. 5, рис. 6).

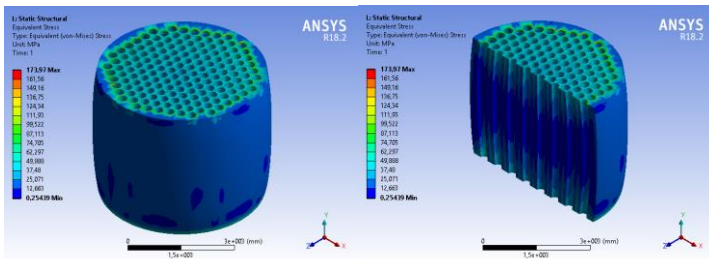


Рисунок 5 – Розподіл поля напружень за об’ємом пластикового сповільнювача

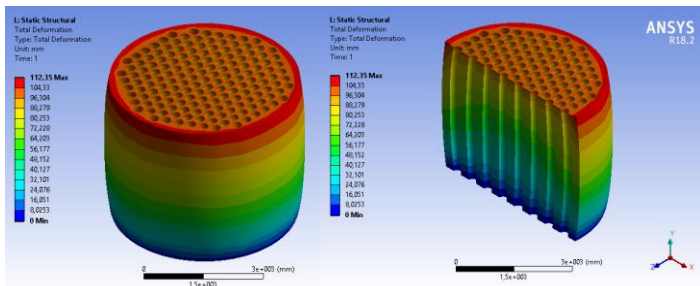


Рисунок 6 – Розподіл поля деформацій за об’ємом пластикового сповільнювача

Проведене дослідження підтверджує можливість застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів в підкритичних системах, що керуються зовнішнім джерелом нейтронів.

У третьому розділі проведеться порівняльний аналіз методів вторинної переробки пластику. Таку переробку доцільно, якщо структура полімеру не була пошкоджена при виготовленні та зазнала незначних змін при використанні. Ознаками розкладання пластику можуть бути зменшення молекулярної маси, морфологічні та структурні зміни, що спричиняють погіршення фізичних властивостей, в тому числі – зниження температури плавлення.

На сьогодні доступні наступні методи переробки пластику: гідроліз, гліколіз, метаноліз, піроліз та механічний рециклінг. Проаналізувавши методи переробки пластикових відходів, а також характеристики утворених продуктів в результаті утилізації, можна зробити висновок, що для моделювання підкритичного реактору із пластиковим сповільнювачем, який буде виготовлений із вторинної сировини, доцільно використовувати продукцію, отриману методом механічного рециклінгу як

таку, що зазнала найменшого впливу деструкції в ході технологічного процесу переробки, зберігши при цьому властивості первинної сировини.

Оскільки найбільш реалізованим на ринку вторинної сировини є ПЕТФ, розглянемо його в якості потенційної сировини для виготовлення системи сповільнення швидких нейтронів. Вторинний ПЕТФ за своїми якісними характеристиками дещо відрізняється від первинного. Він є менш щільним, володіє нижчими показниками термостійкості, має менший поріг стійкості до розтягу та вигину. Однак додаткова стадія агломерації сприяє ущільненню матеріалу та усередненню характеристик вторинної сировини.

При вторинній переробці молекули матеріалу пошкоджуються при механічному навантаженні в екструдері. На якість матеріалу також впливає температурний режим, при якому збільшується активність руху молекул та зв'язки між атомами стають менш міцними, як при звичайних температурах. Після вторинної переробки в полімерних молекулах зв'язки частково розриваються, утворюючи при цьому вільні радикали, які можуть утворювати сполуки із сусідніми пошкодженими молекулами. Таким чином в матеріалі виникають так звані «спайки», значний вміст яких погіршує механічні властивості ПЕТФ. В табл. 4 наводиться порівняння зразків полімеру, отриманого з перероблених пляшок та вихідного полімеру.

Таблиця 4 – Властивості ПЕТФ до та після механічного рециклінгу

Властивість	Первинний ПЕТФ	Повторно перероблений ПЕТФ
Міцність на розтяг, МПа	200	179
Відносне видовження при розриві, %	69,7	36,9
Ударна міцність, Н	135	120
Полідисперсність	7,47	7,94
Об'ємна маса, кг/м ³	0,0015	0,002
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м К	0,14	0,148

Таким чином, показники, що визначають безпеку роботи підкритичного реактору, зазнали несуттєвих змін. Однак проведені дослідження показують, що при наступних процесах переробки пластику властивості матеріалу поступово погіршуються. Враховуючи це, для моделювання підкритичного реактору необхідно здійснити перерахунок товщини сповільнювача в системі та визначити чи затрати на використання вторинної сировини не перевищуватимуть капіталовкладення при застосуванні первинного пластику.

У програмному комплексі WIMS проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора із сповільнювачем із вторинної сировини. За результатами розрахунку побудовано графік залежності коефіцієнта розмноження від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору (рис.7). Графік вказує на необхідність збільшення розмірів товщини сповільнювача у 1,4 рази в порівнянні із еталонним матеріалом.

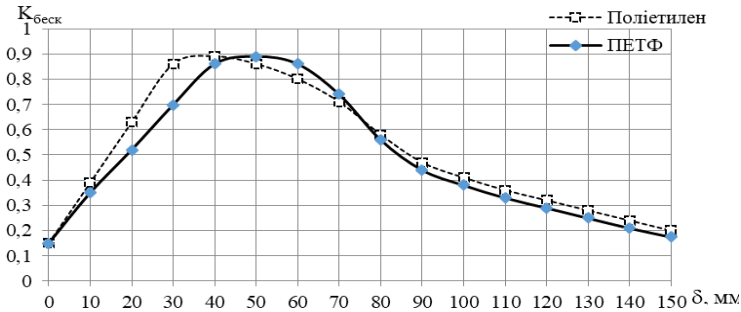


Рисунок 7 – Залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору

Виконано аналогічний сталонному матеріалу повірковий теплогідравлічний розрахунок для ПЕТФу, визначено основні теплотехнічні параметри роботи підкритичного реактору та досліджено розподіл температури сповільнювача за об'ємом реактора (рис. 8), розподіл поля напружень за об'ємом реактора (рис. 9) та розподіл температури теплоносія по висоті активної зони (рис. 10).

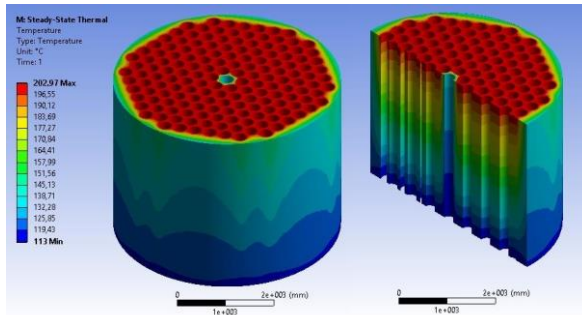


Рисунок 8 – Розподіл температури за об'ємом пластикового сповільнювача

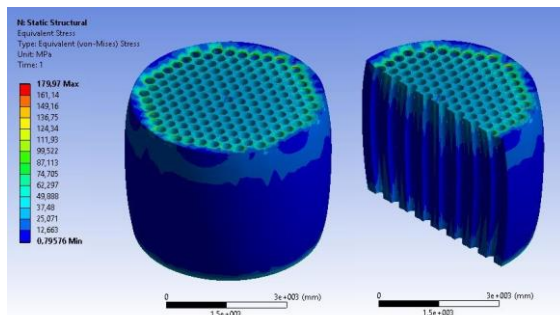


Рисунок 9 – Розподіл поля напружень за об'ємом пластикового сповільнювача

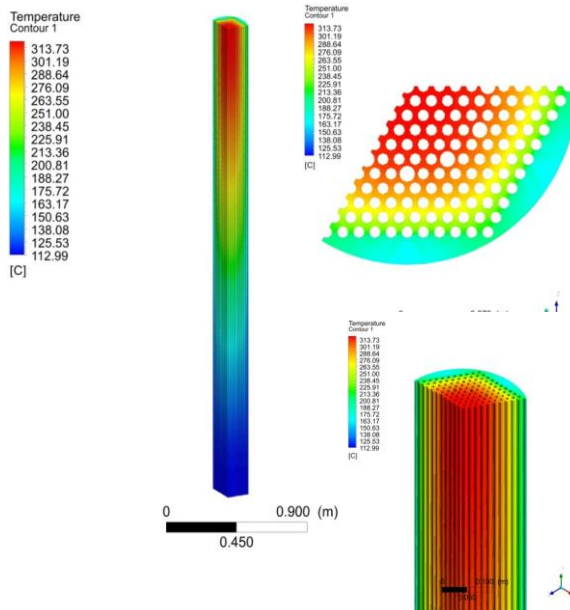


Рисунок 10 – Розподіл температури теплоносія за об'ємом ТВЗ

Виявлено збільшення напруження, що виникає у сповільнювачі із вторинної сировини від 173,97 МПа до 179,97 МПа в порівнянні з попереднім розрахунком (рис. 9) та розширення меж деформацій за об'ємом реактора на 0,01 м (рис.11). Вказані зміни знаходяться в межах допустимих відхилень, що дозволяє застосування вторинної сировини в якості сповільнювачів у підкритичних системах.

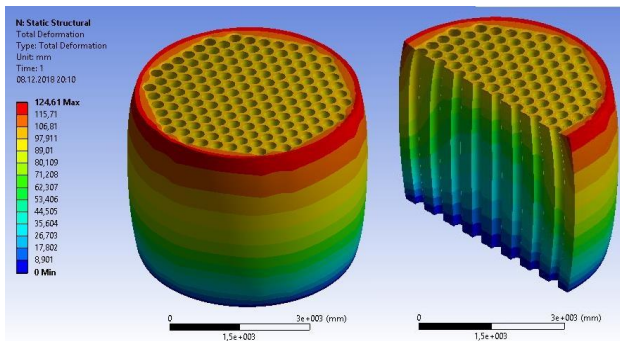


Рисунок 11 – Розподіл поля деформацій за об'ємом пластикового сповільнювача

Визначено, що економічна ефективність використання вторинної сировини з врахуванням збільшення кількості полімеру в 1,3 рази в порівнянні з еталонним поліетиленом, окреслюється економією капіталовкладень у розмірі 1 197 683 грн на момент проведення розрахунку.

Екологічна ефективність функціонування даної системи повинна характеризуватись радіоактивною безпечністю експлуатації такої установки. В процесі спалюванні радіоактивного палива в енергетичному реакторі безперервно утворюється високоактивний аргон-41 з періодом напіврозпаду 1,85 години. Для того, аби досягнути необхідного рівня безпеки функціонування підкритичного ядерного реактора з пластиковим сповільнювачем розраховується товщину шару поглинач нейтронів, в даному випадку вторинного ПЕТФ. При цьому враховується обмеженість геометричних розмірів реактору та зміна властивостей пластику після повторних циклів переробки. В результаті розрахунку отримано графічну залежність забруднення повітря радіоактивним ^{41}Ar від товщини зовнішнього шару сповільнювача після кожного циклу переробки, що наведена на рис. 7.

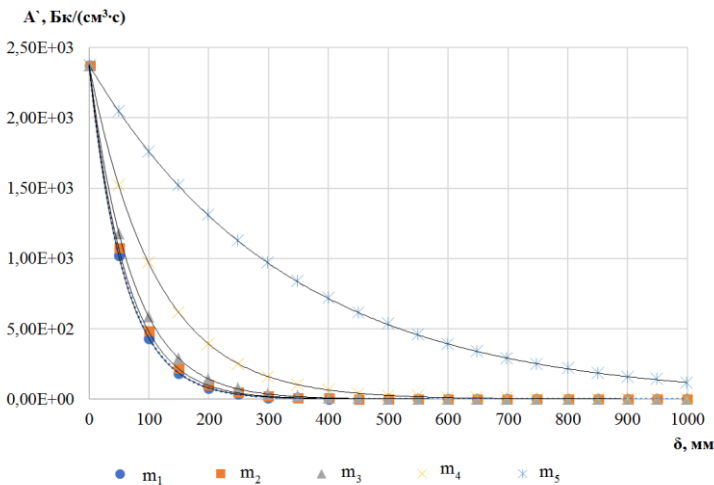


Рисунок 7 – Залежність забруднення повітря радіоактивним ^{41}Ar від товщини зовнішнього шару сповільнювача

За допомогою програмного комплексу Microsoft Office Excel методом експоненціальної апроксимації отримано рівняння, що описують вищенаведені залежності:

- при одному циклі переробки $m=1$: $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,017 \cdot \delta}$;
- при двох циклах переробки $m=2$: $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,016 \cdot \delta}$;
- при трьох циклах переробки $m=3$: $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,014 \cdot \delta}$;
- при чотирьох циклах переробки $m=4$: $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,009 \cdot \delta}$;

— при п'яти циклах переробки $m=5$: $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,003 \cdot \delta}$.

Визначено залежність коефіцієнт пропускання іонізуючого випромінювання від кількості циклів переробки для ПЕТФу (рис. 8) та рівняння, що її описує:

$$k = 2 \cdot 10^{-17} \cdot m^3 + 0,0009 \cdot m^2 - 0,0021 \cdot m - 0,0158.$$

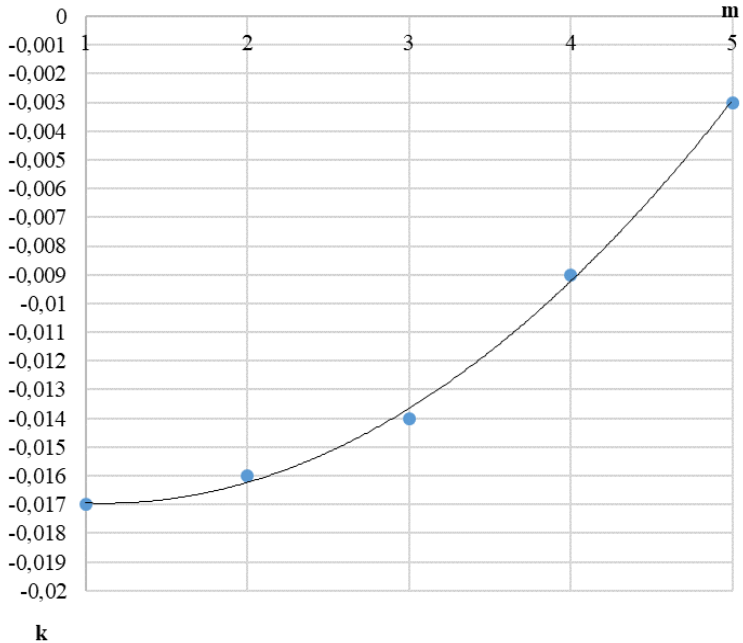


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від циклу переробки матеріалу захисного шару

За результатами розрахунку можна зробити висновок, що зі збільшенням кількості циклів переробки захисні властивості ПЕТФу щодо іонізаційного випромінювання погіршуються. Допустима кількість циклів переробки для даного типу матеріалу становить три, при якій товщина сповільнювача становитиме 750 мм, в порівнянні з 650 мм – при двох циклах, та 600 мм – при одному циклі переробки. При даних параметрах сповільнювача нормативний критерій щодо активності ^{41}Ag в атмосферному повітрі, відповідно до рекомендацій Міжнародної комісії з радіаційного захисту, не порушується.

При подальших циклах переробки необхідна товщина захисного шару буде значно збільшуватися та використання такої сировини буде економічно недоцільним.

У четвертому розділі проведено розробку стартап-проекту, головною ідеєю якого є впровадження модернізованої системи сповільнення швидких нейтронів при трансмутації радіоактивних відходів у підкритичних ядерних установках, що дозволяє сповільнювати швидкі нейтрони, згенеровані зовнішнім джерелом, до енергії теплового руху. В таблиці 5 визначено зміст ідеї, можливі напрямки її застосування та окреслено основні вигоди, які може отримати користувач даної технології.

Таблиця 5 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Модернізована системи сповільнення швидких нейтронів при трансмутації радіоактивних відходів у підкритичних ядерних установках дозволяє сповільнювати швидкі нейтрони, згенеровані зовнішнім джерелом, до енергії теплового руху	Ядерна енергетика, екологічна діяльність	Підвищення ефективності трансмутації відходів
		Зниження енергозатрат джерела на генерацію додаткового потоку нейтронів
		Зменшення кількості ВЯП з одночасним використанням вторинної сировини – ПЕТФ
		Відсутність затрат або їх зменшення на утилізацію відходів

Система дозволяє знизити експлуатаційні витрати, конструкція установки передбачає можливість переробки ТВЗ без конструктивних налаштувань та можливість перевантаження палива без зупинки роботи реактора. Запропонована технологія характеризується максимальним коефіцієнтом встановленої потужності та підвищеними показниками екологічної безпеки. В таблиці 6 наведено SWOT-аналіз стартап-проекту.

Таблиця 6 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Наявність вітчизняних постачальників сировини	Відсутність результатів апробації, валідації або верифікації системи
Наявність вітчизняних користувачів технологією	Відсутність патенту
Відповідність міжнародним та державним стандартам	Нестача досвіду експлуатації подібних установок
Високий рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій	-
Максимальний коефіцієнт використання встановленої потужності	-
Можливості:	Загрози:
Відсутність затрат або їх зменшення на утилізацію відходів	Обмеження, зумовлені статусом безядерної країни
Зменшення кількості ВЯП з одночасним використанням вторинної сировини – ПЕТФ	Тривалість процедури отримання сертифікатів ISO
Вихід на міжнародний ринок	Негативна реакція населення на реалізацію потенційно небезпечного об'єкту
Зниження енергозатрат джерела на генерацію додаткового потоку нейтронів	Відмова від атомної енергетики

Етапами технології реалізації ідеї проекту є: отримання сировини для формування тіла сповільнювача здійснюватиметься шляхом закупівлі готових пластівців вторинного ПЕТФ; формування об'єму реактора можливе методом плавлення наданої сировини компанією-підрядником; паливо для функціонування підкритичної збірки постачатиметься із діючих на території України АЕС.

Виокремлено перелік факторів загроз: обмеження зумовлені статусом безядерної країни, затягування процедури отримання сертифікатів ISO, відсутність результатів апробації та негативна реакція населення на будівництво потенційно небезпечного об'єкту.

В якості факторів конкурентоспроможності обрано високий рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій, максимальний коефіцієнт використання встановленої потужності та незначні амортизаційні відрахування продукту.

За альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту прийнято поширення комерційних пропозицій серед цільової аудиторії вітчизняних користувачів. В якості цільових груп обрано Міністерство енергетики та вугільної промисловості України та експлуатуючу компанію НАЕК «Енергоатом».

Застосування пропонованого комплексу реалізації проекту на вітчизняному ринку повинен принести разовий прибуток у розмірі близько 800 тис. грн протягом 1 року від дати отримання сертифікату відповідності.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, у якій вирішена прикладна задача удосконалення системи сповільнення швидких нейтронів при трансмутації радіоактивних відходів реакторів АЕС.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Визначено необхідні умови для трансмутації відходів ядерної енергетики, доведено необхідність сповільнення швидких нейтронів в підкритичних ядерних установках, що керовані зовнішнім джерелом нейтронів.

2. Обґрунтовано доцільність проведення дослідження можливості застосування пластику в якості сповільнювача в підкритичних системах, досліджено існуючий теоретичний та практичний досвід застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів, виявлено відсутність розробок, що засновані на використанні пластику, який піддавався утилізації.

3. Визначено основні параметри, що визначають роботу підкритичної ядерної установки. Методом ієрархій за Т. Саагі проведено порівняння полімерних матеріалів, що можуть бути використані в якості сповільнювача, та доведено оптимальність застосування поліетилену низького тиску.

4. У програмному комплексі WIMS проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора з поліетиленовим сповільнювачем, визначено ядерні концентрації ізотопів, що містяться в ВЯП, встановлено залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору.

5. Визначено основні показники безпеки функціонування підкритичного реактору з поліетиленовим сповільнювачем та встановлені основні локації можливих деформацій, результати свідчать про можливість застосування синтетичних полімерів в якості сповільнювачів у підкритичних системах.

6. Проведено порівняльний аналіз методів вторинної переробки пластику та обрано механічний рециклінг як такий, що чинить найменший деструкційний вплив в ході технологічного процесу переробки, проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора із сповільнювачем із вторинної сировини, доведено необхідність збільшення розмірів товщини сповільнювача у 1,4 рази в порівнянні із еталонним матеріалом. Виявлено розширення діапазону робочих температур, що, при одночасному зниженні швидкості теплоносія в каналах активної зони у 3,57 рази, дозволяє зменшити витрату рідкого натрію у 3,6 рази.

7. Виконано повірковий теплогідравлічний розрахунок для ПЕТФу, виявлено збільшення напруження, що виникає у сповільнювачі із вторинної сировини від 173,97 МПа до 179,97 МПа в порівнянні з еталонним реактором та розширення меж деформацій за об'ємом реактора на 0,01 м. Вказані зміни знаходяться в межах допустимих відхилень, що дозволяє застосування вторинної сировини в якості сповільнювачів у підкритичних системах.

8. Визначено, що економічна ефективність використання вторинної сировини з врахуванням збільшення кількості полімеру в 1,3 рази в порівнянні з еталонним поліетиленом, окреслюється економією капіталовкладень у розмірі 1 197 683 грн на момент проведення розрахунку.

9. Отримано залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від товщини зовнішнього шару сповільнювача після циклічних етапів переробки, яка описується поліномом 3-го порядку.

10. Виявлено, що допустима кількість циклів переробки для ПЕТФу становить три, при якій товщина сповільнювача становитиме 750 мм. При даних параметрах сповільнювача нормативний критерій щодо активності ^{41}Ar в атмосферному повітрі не порушується. При подальших циклах переробки використання вторинної сировини буде економічно недоцільним.

11. Розроблений стартап-проект реалізації технології на вітчизняному ринку прогнозує отримання разового прибутку у розмірі близько 800 тис. грн протягом 1 року від дати отримання сертифікату відповідності.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Тези доповідей на науково-практичних конференціях:

1. Онисимчук Т. М. Застосування пластику в якості сповільнювача в підкритичних ядерних установках, керованих прискорювачами. *Матеріали I Науково-технічної конференції магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів)*. 2018. 48 с.

АНОТАЦІЯ

Онисимчук Т.М. Трансмутація радіоактивних відходів з удосконаленням системи сповільнення швидких нейтронів. – Рукопису.

Дисертація на здобуття магістерського наукового ступеня за освітньо-професійною програмою за спеціальністю 101 – екологія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2018.

Дисертацію присвячено впровадженню системи сповільнення швидких нейтронів в підкритичних ядерних установках, керованих зовнішнім джерелом, виконаної із вторинно переробленого поліетилентерефталату.

У дисертації визначено показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиковим сповільнювачем, доведено можливість застосування вторинного полімеру в якості сповільнювача швидких нейтронів та встановлено залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від циклу переробки матеріалу захисного шару.

Визначено, що економічна ефективність використання вторинної сировини з врахуванням збільшення кількості полімеру в 1,3 рази в порівнянні з еталонним поліетиленом, окреслюється економією капіталовкладень у розмірі 1 197 683 грн на момент проведення розрахунку.

Отримано залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від товщини зовнішнього шару сповільнювача після циклічних етапів переробки, яка описується поліномом 3-го порядку. Виявлено, що допустима кількість циклів переробки для поліетилентерефталату становить три, при якій товщина сповільнювача становитиме 750 мм. При подальших циклах переробки використання вторинної сировини економічно недоцільне.

Розроблений стартап-проект реалізації технології на вітчизняному ринку прогнозує отримання разового прибутку у розмірі близько 800 тис. грн протягом 1 року від дати отримання сертифікату відповідності.

Ключові слова: вторинна сировина, підкритичний ядерний реактор, полімер, сповільнювач, трансмутація відпрацьованого ядерного палива.

АННОТАЦИЯ

Онисимчук Т.М. Трансмутация радиоактивных отходов с совершенствованием системы замедления быстрых нейтронов. - Рукописи.

Диссертация на соискание магистерской ученой степени по образовательно-профессиональной программе по специальности 101 - экология. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Министерство образования и науки Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена внедрению системы замедления быстрых нейтронов в подкритических ядерных установках, управляемых внешним источником, выполненной из вторично переработанного полиэтилентерефталата.

В диссертации определены показатели безопасности функционирования подкритических систем с пластиковым замедлителем, доказана возможность применения вторичного полимера в качестве замедлителя быстрых нейтронов и установлена зависимость коэффициента пропускания ионизирующего излучения от цикла переработки материала защитного слоя.

Определено, что экономическая эффективность использования вторичного сырья с учетом увеличения количества полимера в 1,3 раза в сравнении с эталонным полиэтиленом, определяется экономией капиталовложений в размере 1 197 683 грн на момент проведения расчета.

Получена зависимость коэффициента пропускания ионизирующего излучения от толщины внешнего слоя замедлителя после циклических этапов переработки, которая описывается полиномом 3-го порядка. Выявлено, что допустимое количество циклов переработки для полиэтилентерефталата составляет три, при котором толщина замедлителя составит 750 мм. При последующих циклах переработки использование вторичного сырья экономически нецелесообразно.

Разработан стартап-проект реализации технологии на отечественном рынке прогнозирует получение разового дохода в размере около 800 тыс. грн в течение 1 года от даты получения сертификата соответствия.

Ключевые слова: вторичное сырье, подкритичный ядерный реактор, полимер, замедлитель, трансмутация отработанного ядерного топлива.

ABSTRACT

Onysymchuk T.M. Transmutation of radioactive waste with the improvement of the system of slow-moving fast neutrons. - The manuscript.

Tesis for a master's degree by educational-professional program, specialty 101 - ecology. - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the introduction of a fast neutron slowdown system in subcritical nuclear installations controlled by an external source made from recycled polyethylene terephthalate.

The dissertation defines the performance indicators of subcritical systems with plastic moderator, proved the possibility of using the secondary polymer as a moderator of fast neutrons, and the dependence of the ionizing radiation transmittance coefficient on the cycle of processing the material of the protective layer has been established.

It is determined that the economic efficiency of the use of secondary raw materials, taking into account the increase in the amount of polymer in 1.3 times compared with the reference polyethylene, is defined by the savings of investments in the amount of 1 197 683 UAH at the time of calculation.

The dependence of transmittance coefficient of ionizing radiation on the thickness of the outer layer of the retarder after the cyclic stages of processing, which is described by the polynomial of the 3rd order, is obtained. It was found that the permissible number of recycling cycles for polyethylene terephthalate is three, in which the thickness of the moderator will be 750 mm. In subsequent cycles of recycling, the use of secondary raw materials will be economically impractical.

The developed start-up project of technology implementation on the domestic market predicts a one-time profit of about 800 thousand UAH for 1 year from the date of receipt of the certificate of conformity.

Key words: secondary raw material, subcritical nuclear reactor, polymer, moderator, transmutation of spent nuclear fuel.

Онисимчук Тетяна Михайлівна

**Трансмутація радіоактивних відходів з модернізацією системи
сповільнення швидких нейтронів**

101 – Екологія

(Автореферат)