

І. М. Карнаухов, А. Ю. Зелінський, А. О. Мициков, П. І. Гладких*,
В. В. Ганн, Б. В. Борц, В. Т. Биков, І. В. Ушаков

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків, Україна

*Відповідальний автор: gladkikh@kipt.kharkov.ua

ОБҐРУНТУВАННЯ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОЄКТНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ АКТИВНОЇ ЗОНИ ПІДКРИТИЧНОЇ ЗБІРКИ З ВОЛЬФРАМОВОЮ МІШЕННЮ

Досліджено вплив модельних параметрів та невизначеності значень перерізів ядерних реакцій на значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів активної зони підкритичної збірки ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів». Дослідження базується на числовому моделюванні за допомогою міжнародного програмного коду MCNP 6.2. З обґрунтуванням ядерної безпеки показана можливість досягнення проєктного завантаження ядерного палива в кількості 38 ТВЗ для активної зони підкритичної збірки з вольфрамовою нейтроноутворюючою мішенню.

Ключові слова: ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів, підкритична збірка, ядерна безпека, ядерна підкритична установка.

1. Вступ

Одним з найважливіших завдань під час експлуатації ядерної установки будь-якого типу є забезпечення ядерної безпеки. Для ядерних підкритичних установок основним критерієм забезпечення ядерної безпеки є неперевищення ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів k_{ef} величини 0,98 у процесі нормальної експлуатації, при порушеннях нормальної експлуатації та проєктних аваріях відповідно до нормативного документа [1].

На етапі проєктування ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, що керується прискорювачем електронів» (ЯПУ «Джерело нейтронів») [2, 3] результати модельних розрахунків для конфігурації активної зони з вольфрамовою нейтроноутворюючою мішенню підтвердили, що використання вольфраму в якості матеріалу пластин мішені призводить до поглинання нейтронів в активній зоні підкритичної збірки, знижуючи, таким чином, значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} . При цьому, вилучення вольфрамової мішені з активної зони підкритичної збірки призводить до зростання ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} . Виходячи з цього, при погодженні попереднього звіту з аналізу безпеки ЯПУ «Джерело нейтронів» Державною інспекцією ядерного регулювання України (Держатомрегулювання України) прийнято рішення щодо необхідності узгодження кожного завантаження активної зони підкритичної збірки [4].

Спочатку передбачалося, що для досягнення ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів k_{ef} максимального значення 0,98 усередину активної зони підкритичної збірки з вольфрамовою мішенню буде завантажено 42 ТВЗ. Однак, виходячи з описаного вище ефекту впливу вилучення мішені на величину ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} , на підставі модельних розрахунків Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ) та незалежних перевірочних розрахунків Держатомрегулювання України [4] для вольфрамової нейтроноутворюючої мішені встановлено проєктну межу безпечної експлуатації за ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів k_{ef} на рівні значення 0,96, що відповідає завантаженню ядерного палива у кількості 38 ТВЗ. Таким чином, критерій безпеки ($k_{ef} \leq 0,98$) не перевищується в усіх режимах експлуатації установки, в тому числі у разі вилучення вольфрамової мішені з активної зони підкритичної збірки.

Разом з цим, при виконанні перевірочного розрахунку для стадії фізичного пуску ЯПУ «Джерело нейтронів» результати ННЦ ХФТІ та Держатомрегулювання України показали незначне перевищення значенням ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} максимального проєктного значення 0,96 для активної зони підкритичної збірки з 38 ТВЗ та вольфрамовою мішенню ($k_{ef} = 0,96104 \pm 0,00005$). Тому було прийнято рішення про завершення фізичного пуску ЯПУ «Джерело нейтронів» після завантаження в активну зону підкритичної збірки

© Автор(и), 2026

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

37 ТВЗ [5, 6] з можливістю окремого обґрунтування та завантаження 38 ТВЗ. Перевищення максимального проектного значення $k_{ef} = 0,96$ для вольфрамової мішені потенційно може бути пов'язане з консервативним підходом до обґрунтування безпеки в процесі моделювання, а також невизначеністю даних моделювання.

Нижче представлено результати дослідження впливу модельних параметрів та невизначеності значень перерізів ядерних реакцій на значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} активної зони підкритичної збірки ЯПУ «Джерело нейтронів» з вольфрамовою нейтроноутворюючою мішенню. Основною метою даного дослідження було показати потенційну можливість досягнення проектного завантаження активної зони ЯПУ «Джерело нейтронів» у кількості 38 ТВЗ з вольфрамовою нейтроноутворюючою

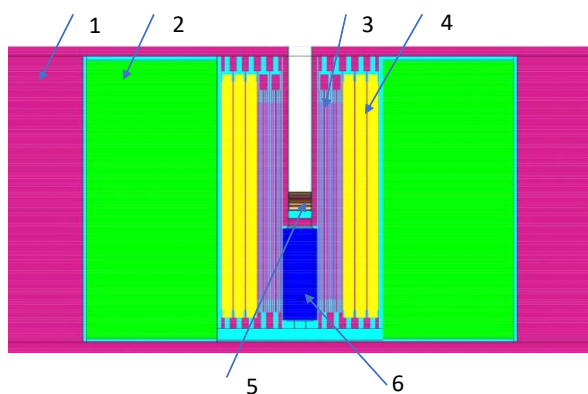


Рис. 1. Z-X переріз моделі підкритичної збірки. 1 – вода, 2 – графітовий відбивач, 3 – паливні елементи, 4 – елементи берилієвого відбивача, 5 – пластины нейтроноутворюючої мішені, 6 – резервуар з гелієм. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Для визначення чутливості моделі підкритичної збірки до зміни її параметрів необхідно варіювати їх відносно деяких «референтних» значень. Як «референтну» використано модель збірки з ТВЗ, параметри якої усереднено за всіма 38 ТВЗ (маси UO_2 , ^{235}U , ^{238}U , довжина твелів, щільність палива, товщина покриття твелів δ). Графіки розподілів значень мас ^{235}U , UO_2 та довжин твелів ТВЗ представлено на рис. 3–5.

Використовуючи ці розподіли, можна визначити значення середньоквадратичних відхилень матеріальних параметрів ТВЗ щодо референтних значень:

- маса ^{235}U в ТВЗ: $M_5 = 41,847 \pm 0,133$ г;
 - маса ^{238}U в ТВЗ: $M_8 = 169,758 \pm 0,722$ г;
 - маса UO_2 в ТВЗ: $M_{UO_2} = 406,094 \pm 1,470$ г;
 - щільність палива:
- $$\rho = 4,22894 \pm 0,0751 \text{ г/см}^3; \quad (1)$$
- довжина твелів: $h = 504,816 \pm 6,353$ мм;
 - товщина покриття твелів $\delta = 0,75 \pm 0,10$ мм.

ючою мішенню та обґрунтувати ядерну безпеку такої конфігурації підкритичної збірки.

Під час аналізу безпеки ЯПУ «Джерело нейтронів» було враховано рекомендації спеціальних посібників з безпеки МАГАТЕ [7–9].

2. Опис моделі

У ході даного дослідження значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} для активної зони підкритичної збірки ЯПУ «Джерело нейтронів» були одержані за допомогою програмного коду MCNP 6.2 [10]. Поздовжній переріз розрахункової моделі підкритичної збірки з вольфрамовою нейтроноутворюючою мішенню та максимальним проектним завантаженням 38 ТВЗ представлено на рис. 1, а поперечний переріз – на рис. 2.

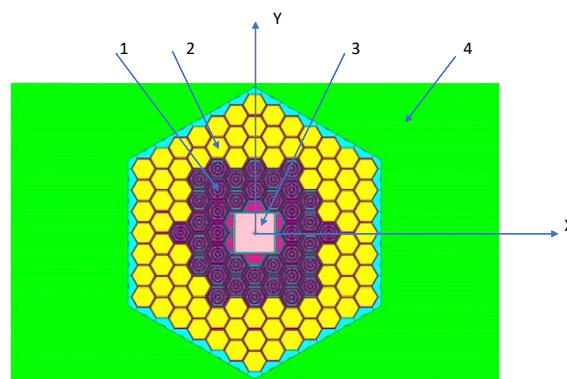


Рис. 2. X-Y переріз моделі підкритичної збірки. 1 – паливні елементи, 2 – елементи берилієвого відбивача, 3 – пластины нейтроноутворюючої мішені, 4 – графітовий відбивач. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

У цих даних середньоквадратичні відхилення параметрів приблизно в 2,0–2,5 раза менше від максимальних відхилень, наведених у паспортних даних для ТВЗ.

Референтні масові частки ізоотопів паливної матриці, обчислені за цими параметрами, описуються такими значеннями:

– масова частка ^{235}U :

$$m_{5U} = M_{5U} / M_{tot} = 0,103053;$$

– масова частка ^{238}U : $m_{8U} = 0,418000$;

– масова частка O_2 : $m_{O_2} = 0,070198$ та алюмінію Al: $m_{Al} = 0,408748$.

Тут M_i – маса ізоотопу i , а M_{tot} – повна маса палива у ТВЗ. Сума масових часток, природно, дорівнює одиниці.

Дуже суттєво, що обрані варіації матеріальних параметрів ТВЗ мають бути статистично незалежними. Такими є зміни концентрацій ^{235}U , ^{238}U , UO_2 та щільності палива в матриці, а також довжина твела та товщина захисного покриття.

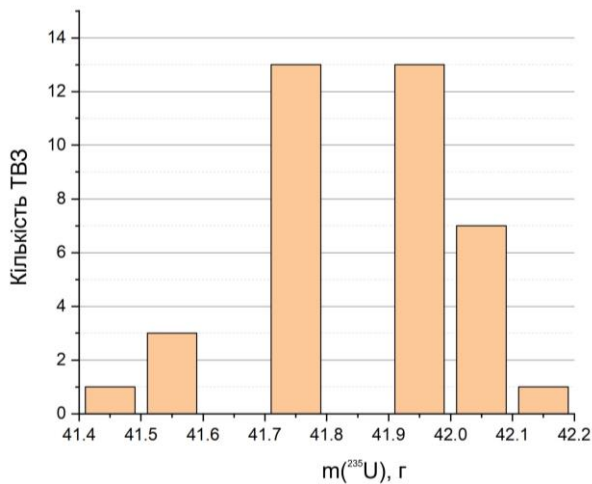


Рис. 3. Розподіл значень мас ізотопу ^{235}U у масиві 38 ТВЗ. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

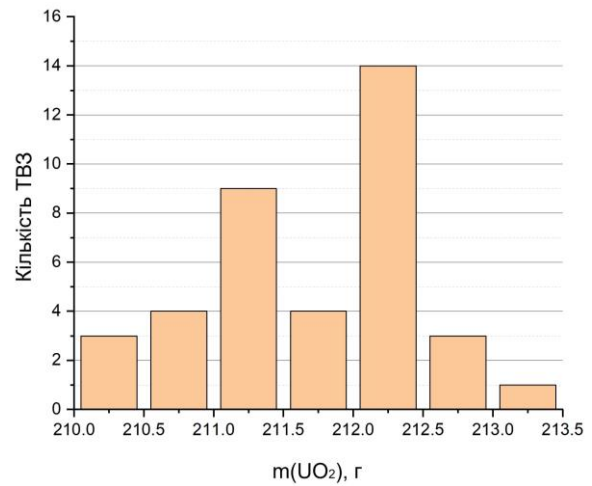


Рис. 4. Розподіл значень мас UO_2 у масиві 38 ТВЗ. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

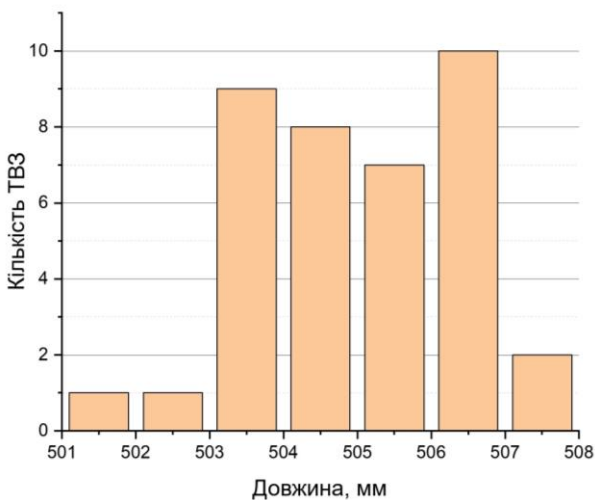


Рис. 5. Розподіл довжин твелів у масиві 38 ТВЗ. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Програма MCNP 6.2 дає можливість користувачеві проводити варіації матеріальних параметрів активної зони за допомогою диференціального оператора PERT. Він дає змогу варіювати щільності матеріалів та їхній ізотопний склад і, крім того, варіювати перерізи обраних реакцій. За допомогою цієї опції програми MCNP 6.2 проведено оцінку впливу концентрацій ^{235}U , ^{238}U , UO_2 та щільності паливної матриці на ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів. Окремо було досліджено залежність коефіцієнта розмноження від геометрії ТВЗ – товщини покриття паливної матриці та довжини твелів.

3. Результати модельних розрахунків

3.1. Референтне значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів

У результаті розрахунків було отримано «референтне» (номінальне) значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} для

конфігурації активної зони підкритичної збірки з вольфрамовою нейтроноутворюючою мішенню та максимальним проєктним завантаженням з 38 ТВЗ:

$$k_{ef} = 0,94478 \pm 0,00006.$$

3.2. Розрахунок коефіцієнтів чутливості

Результати чисельних розрахунків ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} залежно від модельних параметрів елементів активної зони підкритичної збірки ЯПУ «Джерело нейтронів» представлено на рис. 6–11.

Похибка у значенні ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} , що пов'язана з відмінністю реального значення щільності палива від середнього значення $\bar{\rho}$, виражається формулою

$$\Delta k_{ef} = \frac{\partial k_{ef}}{\partial \rho} \Delta \rho,$$

де $\frac{\partial k_{ef}}{\partial \rho}$ – коефіцієнт чутливості k_{ef} по відно-

шенню до зміни щільності ρ . Графік залежності k_{ef} від щільності паливної матриці наведено на рис. 6. Крайні значення щільності на графіку вибрані за формулою

$$\rho_{1,2} = \bar{\rho} \pm 2\overline{\Delta\rho},$$

де значення $\bar{\rho}$ та $\overline{\Delta\rho}$ взяті з (1).

З рис. 6 отримуємо значення коефіцієнта чутливості k_{ef} по відношенню до зміни щільності паливної матриці

$$\frac{\partial k_{ef}}{\partial \rho} = 0,03587 \text{ см}^3/\text{г}.$$

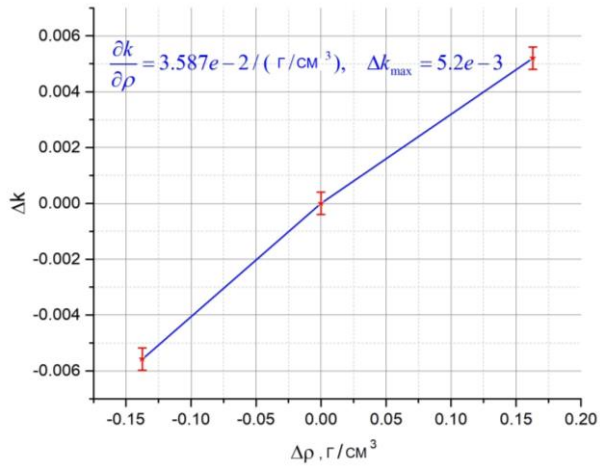


Рис. 6. Залежність k_{ef} від щільності паливної матриці.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

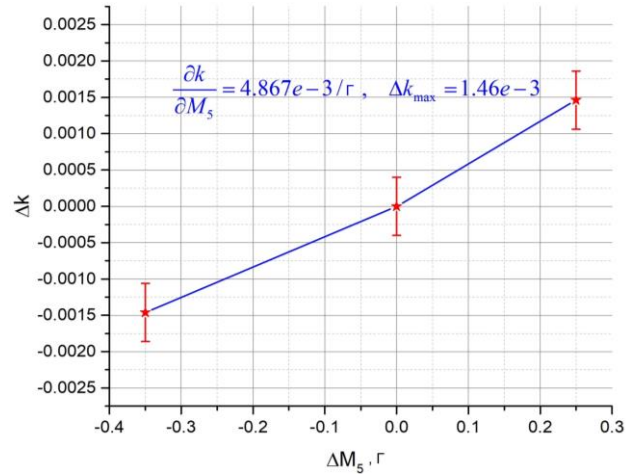


Рис. 7. Вплив маси ^{235}U в ТВЗ на коефіцієнт розмноження нейтронів.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

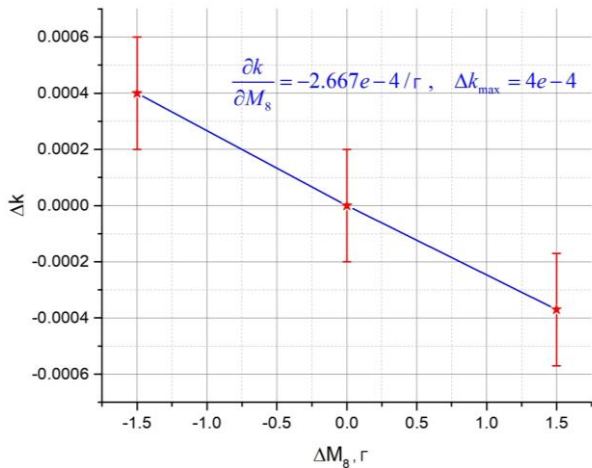


Рис. 8. Вплив маси ^{238}U в ТВЗ на коефіцієнт розмноження нейтронів.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

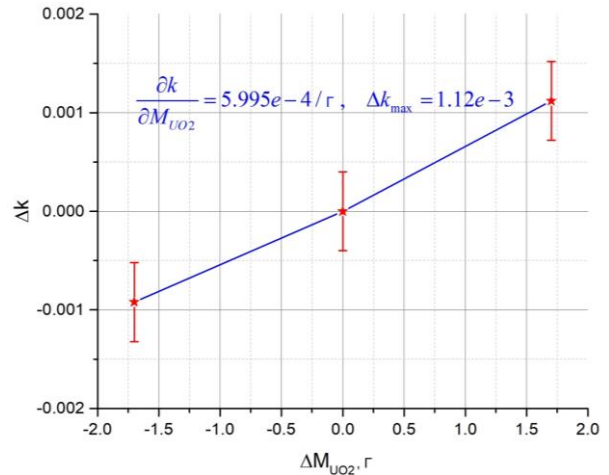


Рис. 9. Залежність коефіцієнта розмноження від маси UO_2 в ТВЗ.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

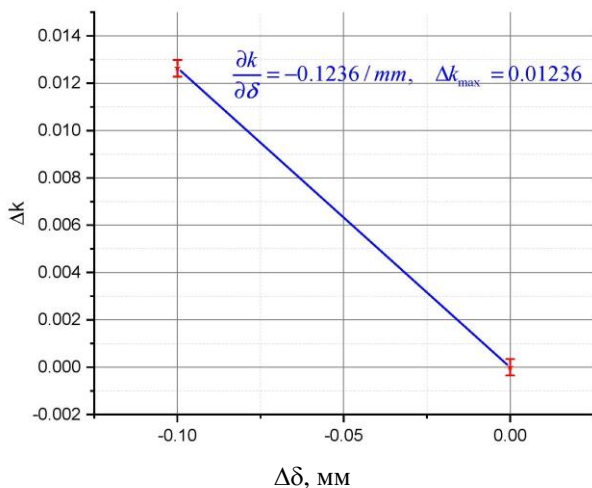


Рис. 10. Приріст значення k_{ef} при зміні товщини покриття твела.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

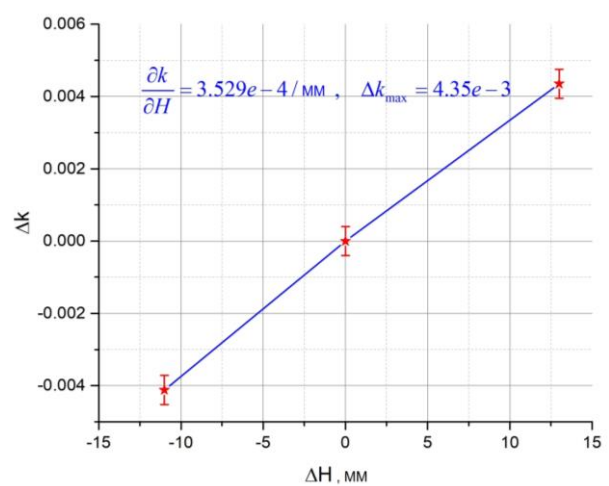


Рис. 11. Залежність коефіцієнта розмноження від довжини твелів.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

На рис. 7 наведено результати моделювання впливу маси ізотопу ^{235}U в ТВЗ на величину k_{ef} .

З рис. 7 отримуємо значення коефіцієнта чутливості k_{ef} по відношенню до зміни маси ізотопу ^{235}U в ТВЗ

$$\frac{\partial k_{ef}}{\partial M_5} = 4,867 \cdot 10^{-3} \text{ 1/г.}$$

На рис. 8 наведено результати моделювання впливу маси ^{238}U в ТВЗ на k_{ef} .

З рис. 8 отримуємо значення коефіцієнта чутливості k_{ef} по відношенню до зміни маси ізотопу ^{238}U в ТВЗ

$$\frac{\partial k_{ef}}{\partial M_8} = -2,667 \cdot 10^{-4} \text{ 1/г.}$$

На рис. 9 представлена залежність коефіцієнта розмноження від маси UO_2 в ТВЗ.

З рис. 9 отримуємо значення коефіцієнта чутливості k_{ef} по відношенню до зміни маси UO_2

$$\frac{\partial k_{ef}}{\partial M_{\text{UO}_2}} = 5,995 \cdot 10^{-4} \text{ 1/г.}$$

Результати розрахунків k_{ef} для товщин покриття твела 0,75 мм (референтне значення) та 0,65 мм наведено на рис. 10.

З рис. 10 отримуємо оцінку коефіцієнта чутливості k_{ef} по відношенню до зміни товщини покриття твела

$$\frac{\partial k_{ef}}{\partial \delta} = -1,236 \cdot 10^{-1} \text{ 1/мм.}$$

На рис. 11 наведена залежність k_{ef} від довжини твелів. Відповідний коефіцієнт чутливості дорівнює

$$\frac{\partial k_{ef}}{\partial H} = 3,529 \cdot 10^{-4} \text{ 1/мм.}$$

3.3. Розрахунок парціальних похибок

У припущенні лінійного характеру залежностей k_{ef} від параметрів p_i у межах малої зміни їхніх значень можна обчислити середньоквадратичні парціальні збільшення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів $\Delta k_i = \frac{\partial k_{ef}}{\partial p_i} \Delta p_i$

через відповідні зміни Δp_i параметрів ТВЗ. Отримані дані щодо середньоквадратичних парціальних приростів k_{ef} зведено в таблиці.

Середньоквадратичні парціальні прирости k_{ef}

Параметр	Значення p_i	Δp_i	$\frac{\partial k_{ef}}{\partial p_i}$	Δk_i
Маса ^{235}U в ТВЗ	41,847 г	0,133	$4,867 \cdot 10^{-3}$	$6,473 \cdot 10^{-4}$
Маса ^{238}U в ТВЗ	169,758 г	0,722	$-2,667 \cdot 10^{-4}$	$1,925 \cdot 10^{-4}$
Маса UO_2 в ТВЗ	406,084 г	1,466	$5,995 \cdot 10^{-4}$	$8,788 \cdot 10^{-4}$
Щільність палива	$4,22894 \text{ г/см}^3$	0,0751	0,03587	$2,694 \cdot 10^{-3}$
Довжина твелів	504,825 мм	6,367	$3,529 \cdot 10^{-4}$	$2,247 \cdot 10^{-3}$
Товщина покриття	0,75 мм	0,10	$-1,266 \cdot 10^{-1}$	$1,266 \cdot 10^{-2}$

Сумарна похибка величини ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} внаслідок неоднорідності геометрії та масового складу ТВЗ становить

$$\Delta k_{ef} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial k_i}{\partial p_i} \Delta p_i \right)^2} = 0,01318.$$

3.3. Врахування невизначеності ядерних даних

При розрахунках значень k_{ef} використовуються бібліотеки перерізів ядерних реакцій σ_j , що містять відомі похибки $\Delta \sigma_j$. Відхилення Δx_j реальних значень перерізів $\tilde{\sigma}_j = \sigma_j + \Delta x_j$ від своїх табличних значень σ_j є випадковими величинами, такими як середнє значення $\overline{\Delta x_j} = 0$, а

середній квадрат $\overline{(\Delta x_j)^2} = (\Delta \sigma_j)^2$. Похибка значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів Δk_{ef} , що пов'язана з відхиленнями реальних значень перерізів $\tilde{\sigma}_j$ від їхніх табличних значень σ_j , виражається формулою

$$\Delta k_{ef} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial k_{ef}}{\partial \sigma_j} \Delta x_j, \quad (2)$$

де $\frac{\partial k_{ef}}{\partial \sigma_j}$ – коефіцієнти чутливості k_{ef} щодо зміни перерізів σ_j . Похибки Δk_{ef} є випадковою величиною, середнє значення якої $\overline{\Delta k_{ef}} = 0$, а середній квадрат $\overline{(\Delta k_{ef})^2} = \sum_{i,j} \frac{\partial k_{ef}}{\partial \sigma_i} \frac{\partial k_{ef}}{\partial \sigma_j} \overline{\Delta x_i \Delta x_j}$

виражається через величину $C_{ij} = \overline{\Delta x_i \Delta x_j}$, яка називається коваріацією двох перерізів $\tilde{\sigma}_i$ та $\tilde{\sigma}_j$.

Величини C_{ij} становлять коваріаційну матрицю похибок перерізів, яка враховує похибки диференціальних вимірювань перерізів ядерних реакцій σ_j і також міститься у бібліотеках оцінених ядерних даних МАГАТЕ. Таким чином, надається можливість обчислити середньоквадратичне значення похибки Δk_{ef} , пов'язаної з похибками ядерних перерізів

$$\Delta k_{ef} = \sqrt{\sum_{i,j} \frac{\partial k_{ef}}{\partial \sigma_i} \frac{\partial k_{ef}}{\partial \sigma_j} C_{ij}}. \quad (3)$$

Однак, похибки, обчислені за формулою (3), набагато перевершують реальні похибки, отримані при виконанні численних критичних експериментів (інтегральні експерименти) та відповідних розрахунків. Тому слід обмежити похибки перерізів Δx_j (і відповідно величини C_{ij}) таким чином, щоб отримані значення Δk_{ef} не суперечили результатам критичних експериментів.

Таким чином, потрібно одночасно враховувати помилки диференціальних вимірювань перерізів ядерних реакцій та використовувати результати інтегральних вимірювань в експериментах на критичних збірках (бенчмарках). Такі розрахунки можна виконати з використанням блока WHISPER програмного комплексу MCNP [11]. Розрахунок проводиться у два етапи: спочатку проводиться розрахунок задачі за програмою MCNP з використанням пакета `whisper_mcnp.pl`, написаного мовою PERL; розраховується базове значення k_{ef} , і статистична частина похибки

Δk_{ef} і коефіцієнти чутливості $\frac{\partial k_{ef}}{\partial \sigma_j}$ для всіх

ядерних реакцій, що використовуються у вирішенні завдання. На другому етапі з використанням пакета `whisper_usl.pl` проводиться запуск програми WHISPER, яка обчислює за формулою (3) попереднє значення Δk_{ef} з коваріантною матрицею C_{ij} (prior-значення Δk_{prior}). Програма WHISPER зчитує також результати 1050 критичних експериментів (інтегральних експериментів) та відповідні розрахунки, взяті у формі бенчмарків. З повного набору 1050 шт. вибираються бенчмарки, найбільш близькі до розглянутої задачі (~150 шт.), визначаються коефіцієнти подібності цих бенчмарків до даної задачі та оцінюються значення Δx_j , що узгоджуються з результатами цих інтегральних експериментів. Методом найменших квадратів визначається

відповідна «підігнана» матриця $\overline{C_{ij}}$ і по ній обчислюються підігнані (adjusted) похибки Δk_{adj} .

Програма WHISPER за замовчуванням розраховує підігнані похибки Δk_{adj} з довірчим рівнем імовірності 99 %, що відповідає похибці менше 3-сигма, а відповідно до вимог українського регулятора похибка k_{ef} повинна розраховуватися з довірчим рівнем імовірності 68 %, що відповідає стандартному відхиленню 1-сигма. Модифікація довірчого рівня ймовірності передбачена у програмі WHISPER та була проведена для наших розрахунків. Фрагмент вихідного файлу програми наведено нижче:

Setting user options

CalcMarginConfidenceLevel = 6.80000E-01

Calculating application nuclear data uncertainties

Application	adjusted	prior
w20d_2g.txt	0.00160	0.00584

Таким чином, з використанням програми WHISPER було визначено попереднє (prior) значення похибки ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів з невизначеності баз ядерних даних Δk_{prior} , обчислене за формулою (3) з коваріаційною матрицею C_{ij} і остаточно (adjusted) величина похибки Δk_{adj} з «підігнаною» коваріаційною матрицею $\overline{C_{ij}}$. Величини похибок визначено з довірчим рівнем ймовірності 68 %:

$$\Delta k_{prior} = 0,00584; \quad \Delta k_{adj} = 0,00160.$$

Підсумовуючи середньоквадратичні парціальні похибки від невизначеностей усіх типів, отримаємо максимальне значення похибки визначення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів через похибки у геометрії, масовому складі та перерізів ядерних реакцій

$$\overline{\Delta k_{ef}} = \Delta k_{ef} + \Delta k_{adj} = 0,01318 + 0,00160 = 0,01478.$$

4. Висновки

Для забезпечення можливості комплектації активної зони підкритичної збірки ЯПУ «Джерело нейтронів» у складі 38 ТВЗ з вольфрамовою нейтроноутворюючою мішенню та з метою аналізу безпеки установки може бути використаний підхід, що враховує допуски та невизначеності ядерних даних. На підставі цього підходу для обчислення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів слід обчислити суму номінального значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів та середньоквадратичних зна-

чень його статистичної похибки та всіх похибок, зумовлених допусками геометрії, масового складу ТВЗ та невизначеності ядерних даних:

$$k = k_{ef} + \Delta k_{ef} + \Delta \overline{k}_{ef} =$$

$$= 0,94478 + 0,00006 + 0,01478 = 0,95962.$$

Отримане в ході цього дослідження значення k не перевищує встановленої межі безпечної експлуатації $k \leq 0,96$ з використанням вольфрамової нейтроноутворюючої мішені та активної зони у складі 38 ТВЗ. Обчислене значення k є нижчим за встановлену межу на 0,00038, повний

запас підкритичності становить 0,04 і відповідає критерію безпеки ЯПУ «Джерело нейтронів», встановленому в нормативній документації [1].

Таким чином, результати даного дослідження можуть бути основою для обґрунтування безпеки комплектації активної зони ЯПУ «Джерело нейтронів» у складі 38 ТВЗ з використанням вольфрамової нейтроноутворюючої мішені.

Завантаження 38 ТВЗ усередину активної зони ЯПУ «Джерело нейтронів» розпочнеться після отримання ННЦ ХФТІ відповідного окремого дозволу Держатомрегулювання України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. НП 306.2.183-2012. «Загальні положення безпеки ядерної підкритичної установки». Затверджено Державною інспекцією ядерного регулювання України, наказ № 56 від 12 березня 2012 р. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 27 квітня 2012 р. за № 640/20953. / Regulatory Document NP 306.2.183-2012. "General Safety Provisions for Nuclear Subcritical Assembly". Approved by State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, Order No. 56 dated 12 March 2012, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 27 April 2012 under No. 640/20953. (Ukr)
2. A.Yu. Zelinsky et al. NSC KIPT neutron source on the base of subcritical assembly driven with electron linear accelerator. In: IPAC 2013: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference, 12–17 May 2013, Shanghai, China (2013) p. 3481.
3. A.N. Vodin et al. NSC KIPT Neutron Source Status. *Probl. At. Sci. Technol.* 6(88) (2013) 3.
4. О. Кухочький та ін. *Ліцензування ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів»: від проектування до фізичного пуску*. За ред. О. Кухочького (Київ: ДНТЦ ЯРБ, 2023) 227 с. / O. Kukhotskyi et al. *Licensing of Subcritical Nuclear Installation "Neutron Source": From Design to Initial Startup*. O. Kukhotskyi (Ed.) (Kyiv: State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2023) 227 p. (Ukr)
5. A. Bykhun et al. Reactivity measurement methods and the first results of the physical start-up for the nuclear subcritical facility "Neutron Source". *Ukr. J. Phys.* 68(3) (2023) 147.
6. I.M. Karnaukhov et al. Research of neutron-physical characteristics of the Subcritical Nuclear Facility "Neutron Source" of NSC KIPT during the physical start-up. *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 3 (2024) 44.
7. *Commissioning of Research Reactors*. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide SSG-80 (Vienna, IAEA, 2023) 84 p.
8. *Core Management and Fuel Handling for Research Reactors*. IAEA Safety Standards. Safety Guide NS-G-4.3 (Vienna, IAEA, 2008) 63 p.
9. *Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants*. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide SSG-2 (Rev.1) (Vienna, IAEA, 2019) 108 p.
10. MCNP® User's Manual. Code Version 6.2. C. J. Werner (Ed.). Report LA-UR-17-29981 (Los Alamos National Laboratory, 2017) 746 p.
11. B. C. Kiedrowski. *Software for Sensitivity- and Uncertainty-Based Nuclear Criticality Safety Validation*. User Manual for Whisper (v1.0.0). Report LA-UR-14-26436 (Los Alamos National Laboratory, 2014) 23 p.

I. M. Karnaukhov, A. Yu. Zelinsky, A. O. Mytsykov, P. I. Gladkikh*,
V. V. Gann, B. V. Borts, V. T. Bykov, I. V. Ushakov

National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, Ukraine

*Corresponding author: gladkikh@kipt.kharkov.ua

NUCLEAR SAFETY VALIDATION FOR THE DESIGN FUEL LOADING OF THE SUBCRITICAL ASSEMBLY CORE WITH THE TUNGSTEN TARGET

The influence of model parameters for the subcritical assembly core of the subcritical nuclear facility "Neutron Source" and uncertainties of nuclear reaction cross sections on the values of the effective neutron multiplication factor is investigated. The analysis is based on numerical simulation using the international software code MCNP 6.2. The possibility of achieving the design nuclear fuel load of 38 fuel assemblies for the subcritical assembly core with the tungsten neutron-generating target is shown with the justification of nuclear safety.

Keywords: effective neutron multiplying factor, subcritical assembly, nuclear safety, subcritical nuclear facility.

Надійшла / Received 09.03.2026