

Аналіз невизначеності макроскопічних перерізів ТВЗ ВВЕР-1000 внаслідок впливу спектрального ефекту

■ **Кухоцька Оксана Василівна**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5551-8622>

■ **Овдієнко Юрій Миколайович**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7016-1841>

■ **Єременко Максим Леонідович**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5411-7920>

У статті наведені результати аналізу невизначеності макроскопічних перерізів тепловиділяючих збірок (ТВЗ) ВВЕР-1000 унаслідок впливу спектрального ефекту під час вигорання палива ВВЕР-1000, а також результати аналізу чутливості перерізів від теплофізичних параметрів розрахункової чарунки, що впливають на енергетичний спектр щільності потоку нейтронів.

Розрахунок зміни ізотопного складу у процесі вигорання та підготовка макроскопічних перерізів виконувались за допомогою розробленої розрахункової моделі в програмі HELIOS [1] для тепловиділяючої збірки альтернативної (ТВЗА), яка на сьогодні експлуатується на більшості енергоблоків ВВЕР-1000 України.

Для кількісної оцінки невизначеності макроскопічних перерізів взаємодії внаслідок впливу спектрального ефекту та аналізу чутливості перерізів від теплофізичних параметрів обрано підхід Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) з використанням програмного забезпечення Software for Uncertainty and Sensitivity Analyses (SUSA) [2]. Вплив спектрального ефекту на макроскопічні перерізи був врахований за допомогою проведення розрахунків вигорання палива для варіаційних наборів теплофізичних параметрів (температури палива, температури та густини теплоносія, концентрації борної кислоти), заздалегідь підготовлених програмою SUSA, в результаті яких був отриманий набір векторів ізотопного складу палива. Після чого були підготовлені нейтронно-фізичні константи (НФК) для референсного стану для кожного із наборів ізотопного складу, що відповідав певному набору теплофізичних параметрів.

На наступному етапі з використанням програми SUSA 4 був проведений аналіз невизначеності макроскопічних перерізів взаємодії внаслідок впливу спектрального ефекту на ізотопний склад палива, після чого був проведений аналіз чутливості перерізів від теплофізичних параметрів розрахункової чарунки, що впливають на енергетичний спектр щільності потоку нейтронів. Надалі, невизначеність двогрупових макроскопічних дифузійних констант, можна використовувати для оцінки загальної невизначеності нейтронно-фізичних характеристик у великосіткових розрахунках активної зони (АкЗ), зокрема під час аналізу безпеки.

Ключові слова: ВВЕР, невизначеність макроскопічних перерізів, спектральний ефект, HELIOS, SUSA.

© Кухоцька О. В., Овдієнко Ю. М., Єременко М. Л., 2020

Вступ

Під час розрахункового моделювання статичних та динамічних нейтронно-фізичних характеристик ядерних реакторів суттєвою проблемою є підготовка малогрупових бібліотек нейтронно-фізичних перерізів.

Для вирішення цієї проблеми важливо, перш за все, досягнути необхідної точності підготовки НФК, з яких формується бібліотека макроскопічних нейтронно-фізичних перерізів взаємодії, що надалі використовуються в малогрупових дифузійних розрахунках стаціонарних станів та перехідних режимів реакторів.

На сьогодні існує низка програм для підготовки малогрупових бібліотек нейтронно-фізичних перерізів (HELIOS, WIMS, CASMO, TBC-M, SERPENT, PHOENIX, SRAC). Усталена практика передбачає під час підготовки бібліотеки виконувати розрахунок зміни ізотопного складу для певного референсного стану, що зазвичай характеризується середніми теплофізичними параметрами в Ак3 реактора.

Проте, під час проведення нейтронно-фізичних розрахунків, зокрема в рамках аналізу безпеки реакторів, вагомий внесок у точність результатів розрахунку вносить саме об'ємний розподіл нейтронних перерізів взаємодії та їх залежність не тільки від теплофізичних параметрів в Ак3 реактора, а й від історії вигорання. Тому необхідно враховувати, що зміна умов, за яких вигорятиме паливо, буде впливати на спектр нейтронів у чарунці та надалі на зміну ізотопного складу, а отже і на макроскопічні перерізи взаємодії.

Кількісна оцінка невизначеності та чутливості макроскопічних перерізів взаємодії внаслідок впливу спектрального ефекту аналізувалася через зміну ізотопного складу внаслідок зміщення спектра щільності потоку нейтронів за допомогою варіації параметрів експлуатації палива.

Оскільки розрахунки зміни ізотопного складу є невід'ємною частиною підготовки малогрупових бібліотек нейтронно-фізичних перерізів та визначають точність визначення всіх подальших нейтронно-фізичних характеристик Ак3, метою цієї статті – є оцінка величини невизначеності та чутливості макроскопічних перерізів взаємодії ТВ3 ВВЕР-1000 унаслідок впливу спектрального ефекту, що надалі дасть змогу удосконалити розрахунки макроскопічних перерізів взаємодії, тим самим покращивши якість підготовки малогрупових бібліотек нейтронно-фізичних перерізів, а отже і підвищити якість прогнозування поведінки реакторної установки та, відповідно, безпеку її експлуатації.

1 Підготовка вхідних даних для аналізу невизначеності та чутливості макроскопічних перерізів взаємодії ТВ3 ВВЕР-1000 внаслідок впливу спектрального ефекту для розрахункової моделі HELIOS за допомогою програмного забезпечення SUSA

Проаналізувавши описи бібліотек перерізів для найбільш використовуваних кодів, а також враховуючи специфіку реакторів типу ВВЕР, для дослідження впливу спектрального ефекту на макроскопічні перерізи ТВ3А визначено основні параметри, варіація яких призводить до зміни спектра нейтронів, а відповідно, і на зміну ізотопного складу в процесі вигорання палива, та надалі на макроскопічні перерізи взаємодії, а саме: температура палива, густина та температура теплоносія, концентрація борної кислоти.

Для підготовки різних наборів теплофізичних параметрів, використаних у розрахунковій моделі HELIOS під час проведення розрахунків вигорання, обрано програмне забезпечення SUSA, що є інтелектуальною власністю GRS. Перша версія SUSA була доступна на початку 1990-х років. З того часу програмне забезпечення SUSA постійно вдосконалювалося, насамперед, відповідно до потреб у сфері аналізу безпеки ядерних реакторів. Наразі доступна версія SUSA 4, яку і було обрано для подальшого аналізу невизначеності та чутливості. Ця версія є важливою складовою парку розрахункових кодів GRS для аналізу безпеки атомних електростанцій, адже є досить потужним інструментом для аналізу невизначеності та чутливості обчислювальних результатів.

SUSA 4 поєднує добре відомі підходи до обчислення ймовірностей та статистики із зручним графічним інтерфейсом. Вбудовані різні показники чутливості допомагають виявити ті вхідні невизначеності, які здебільшого впливають на невизначеність усієї розрахункової моделі [3].

Вхідними даними для аналізу невизначеності та чутливості, а саме підготовки різних наборів теплофізичних параметрів для моделі SUSA, задані вхідні параметри, які впливають на спектр щільності потоку нейтронів, а саме: температура палива, температура та густина теплоносія, концентрація борної кислоти, функцією яких є НФК, та відповідні кількісні показники їх невизначеності, визначені на основі досвіду експлуатації паливної касети ВВЕР-1000 в Ак3 (Таблиця 1).

Невизначеність вхідних параметрів кількісно визначена як рівномірний (неперервний) розподіл ймовірностей – $1/(Max-Min)$.

Практика показує, що найбільш ефективним методом генерації варіаційних наборів вихідних параметрів для аналізу невизначеності об-

Таблиця 1 – Невизначеність вхідних параметрів

| Вхідний параметр | Мінімальне значення (Min) | Референсне значення | Максимальне значення (Max) |
|--|---------------------------|---------------------|----------------------------|
| Густина теплоносія, ρ_{cool} (кг/м ³) | 667 | 707 | 751 |
| Температура теплоносія, T_{cool} (К) | 553 | 576 | 593 |
| Температура палива, T_f (К) | 560 | 928 | 1078 |
| Концентрація борної кислоти, C_b (г/кг) | 0 | 3 | 6 |

числювального результату та отримання кількісної оцінки їх впливу є метод Монте-Карло. Застосований метод оцінки невизначеності GRS [2] заснований на використанні формули Вілкса для розрахунку обсягу вибірки, необхідного для визначення із заданою імовірністю вибраного довірчого інтервалу. Ця оцінка не залежить від функціональної форми розподілу сукупності, з якої взята вибірка, а число і характер вихідних невизначеностей не впливає на достовірність аналізу. З використанням зазначеного підходу згенеровано набори варіаційних значень теплофізичних параметрів (100 наборів значень для забезпечення двостороннього довірчого інтервалу 95 % зміни НФК з імовірністю 95 % [4]), після чого для кожного набору значень теплофізичних параметрів підготовлено 100 вхідних файлів для розрахунків програмою HELIOS.

2 Підготовка макроскопічних перерізів ТВЗ ВВЕР-1000 для різних наборів теплофізичних параметрів за допомогою програми HELIOS

З метою проведення розрахунків вигорання паливної касети та підготовки макроскопічних перерізів гомогенізованих чарунок ТВЗ ВВЕР-1000 для різних наборів теплофізичних параметрів розроблена розрахункова модель ТВЗ (Рисунок 1) для програми HELIOS.

Загалом, програма HELIOS має двовимірну геометрію. Для вирішення транспортного рівняння в програмі HELIOS застосований комбінований метод (current coupling collision probability method – CCCP method), відповідно до якого просторові елементи зв'язуються за допомогою поверхневих струмів нейтронів, а для визначення потоку нейтронів всередині просторових елементів використовується метод імовірності перших зіткнень [1].

Розрахункова модель розроблена з використанням раніше отриманих за допомогою програмного забезпечення SUSA 4 переліку 100 статистично згенерованих наборів теплофізичних параметрів (T_f , T_{cool} , ρ_{cool} , C_b) щодо яких надалі буде виконуватись аналіз невизначеності макроскопічних перерізів гомогенізованих чарунок ТВЗ ВВЕР-1000 унаслідок впливу спектрального ефекту.

Розроблена модель ТВЗ ВВЕР-1000 HELIOS дозволила виконати детальний розрахунок розподілу щільності потоків нейтронів в об'ємі ТВЗ ВВЕР-1000 під час розрахунку вигорання для визначених раніше наборів теплофізичних параметрів

Грунтуючись на отриманих векторах ізотопного складу для розрахунків із варіаційними наборами теплофізичних (T_f , T_{cool} , ρ_{cool} , C_b) параметрів, щодо яких виконується аналіз невизначеності та чутливості, розраховано набір НФК (D_1 , D_2 , Σ_{a1} , Σ_{a2} , Σ_{f1-2} , Σ_{f1} , Σ_{f2}) для обраного

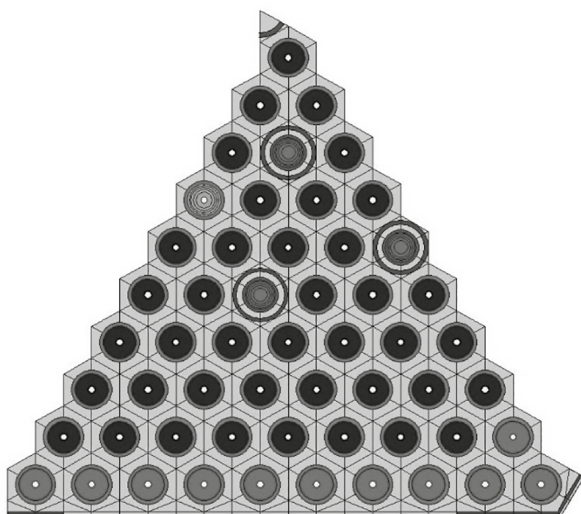


Рисунок 1 – Розрахункова модель ТВЗ для програми HELIOS

референсного стану, який характеризується референсними теплофізичними параметрами: ($T_f = 928 \text{ K}$, $T_{\text{cool}} = 576 \text{ K}$, $\rho_{\text{cool}} = 707 \text{ кг/м}^3$, $C_b = 3 \text{ г/кг}$).

Отриманий набір НФК для референсного стану за різних вигорянь палива із урахуванням впливу спектрального ефекту надалі використовувався програмою SUSA 4 для аналізу невизначеності та чутливості макроскопічних перерізів гомогенізованих чарунок ТВЗ ВВЕР-1000 унаслідок впливу спектрального ефекту.

3 Аналіз невизначеності макроскопічних перерізів ТВЗ ВВЕР-1000 внаслідок впливу спектрального ефекту

У детерміністичних аналізах безпеки для атомних електростанцій стало загальною практикою застосовувати коди найкращої оцінки для аналізу аварій з метою зменшення ступеня консерватизму. Оскільки коди найкращої оцінки використовуються в поєднанні з реалістичними вхідними даними, необхідно враховувати важливі епістемічні невизначеності (невизначеності, зумовлені неповним знанням про явище, яке впливає на здатність моделювати його), які можуть вплинути на обчислювальний результат, і їх вплив на результат потрібно оцінювати кількісно [5].

Існує декілька джерел епістемічної невизначеності, які можуть вплинути на обчислювальний результат. Вагомим джерелом епістемічної невизначеності є реалізовані в комп'ютерному коді формули моделей. Вони, переважно, ґрунтуються на низці спрощень та апроксимацій, що зумовлює певну невизначеність результатів розрахункового аналізу. Інші джерела невизначеності – це чисельні алгоритми рішення, які, зазвичай, містять апроксимації та спрощення, які певним чином впливають на результат, або початкові та граничні умови, які характеризуються певною невизначеністю.

У результаті проведення низки розрахунків отримано величини невизначеності значень макроскопічних перерізів взаємодії, що зумовлені зміною спектра розподілу щільності потоку нейтронів у розрахунковій чарунці паливної касети ВВЕР-1000 (Рисунки 2 – 8).

Аналіз невизначеності впливу спектрального ефекту на коефіцієнт дифузії для швидкої та теплової груп показав, що зміна спектра розподілу густини потоку нейтронів майже не впливає на коефіцієнт дифузії (максимальне відхилення значень коефіцієнтів дифузії в швидкій та теплової групах від їх середніх значень становить 0,31 % та 0,16 %). Вплив на невизначеність макроскопічного перерізу поглинання для швидкої групи дещо більший (максимальне відхилення значень макроскопічного перерізу поглинання від його

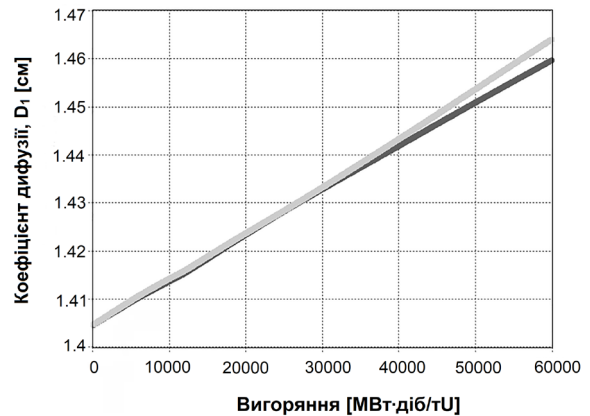


Рисунок 2 – Верхня та нижня межі довірчого інтервалу 95 % значення коефіцієнта дифузії для швидкої групи

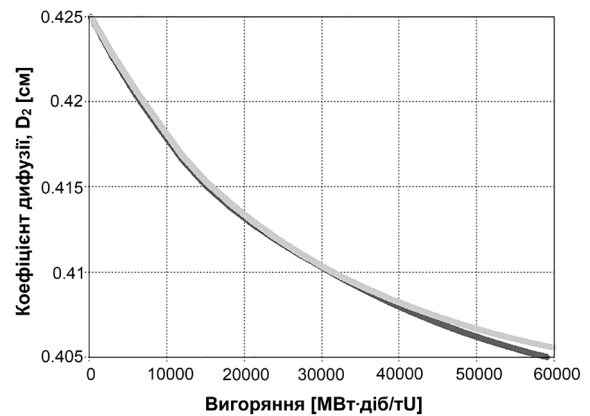


Рисунок 3 – Верхня та нижня межі довірчого інтервалу 95 % значення коефіцієнта дифузії для теплової групи

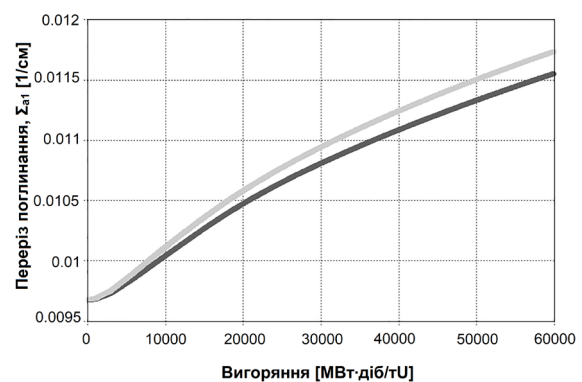


Рисунок 4 – Верхня та нижня межі довірчого інтервалу 95 % значення макроскопічного перерізу поглинання для швидкої групи

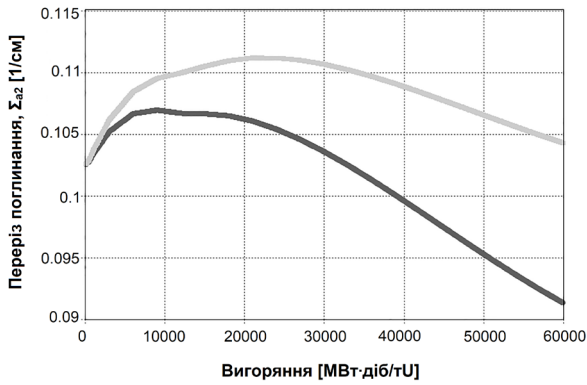


Рисунок 5 – Верхня та нижня межі довірчого інтервалу 95% значення макроскопічного перерізу поглинання для теплової групи

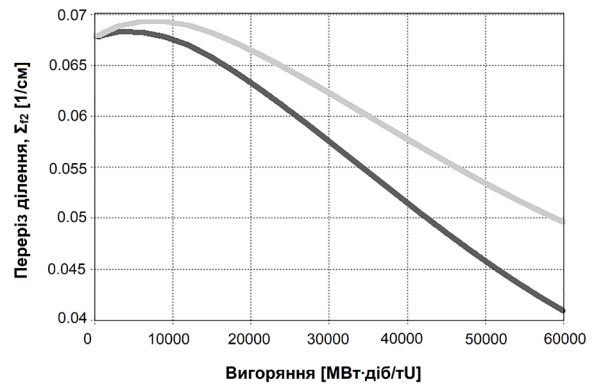


Рисунок 7 – Верхня та нижня межі довірчого інтервалу 95% значення макроскопічного перерізу ділення для теплової групи

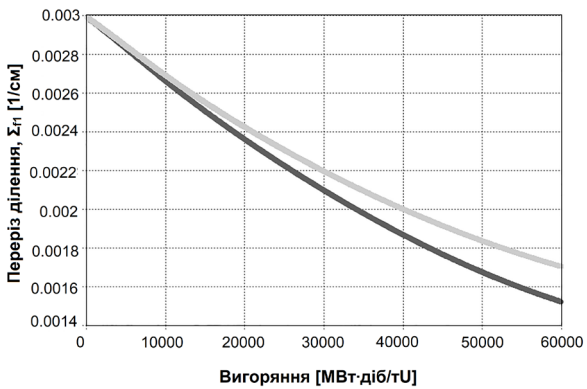


Рисунок 6 – Верхня та нижня межі довірчого інтервалу 95% значення макроскопічного перерізу ділення для швидкої групи

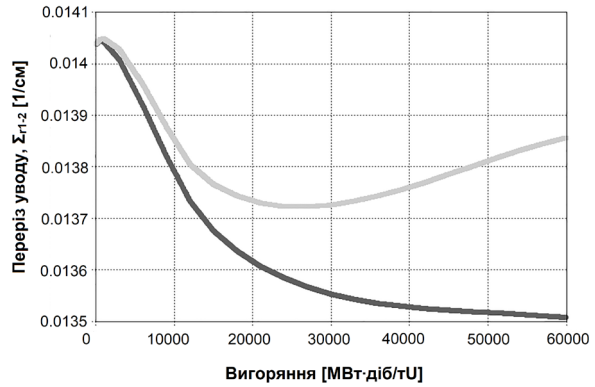


Рисунок 8 – Верхня та нижня межі довірчого інтервалу 95% значення макроскопічного перерізу вводу нейтронів

середнього значення становить 1,69%). Що стосується невизначеності макроскопічного перерізу вводу нейтронів, то вплив спектрального ефекту дещо суттєвіший (максимальне відхилення макроскопічного перерізу вводу нейтронів від його середнього значення становить 2,55%).

Проте, варто зазначити, що спектральний ефект суттєво впливає на невизначеність макроскопічного перерізу ділення (максимальне відхилення макроскопічного перерізу ділення від його середнього значення становить 8,25% для швидкої групи та 14,71% для теплової групи), та на невизначеність макроскопічного перерізу поглинання для теплової групи (максимальне відхилення макроскопічного перерізу поглинання від його середнього значення становить 12,32%).

4 Аналіз чутливості макроскопічних перерізів ТВЗ ВВЕР-1000 від теплофізичних параметрів розрахункової чарунки, що впливають на спектр щільності потоку нейтронів

Проведення додаткового аналізу чутливості дає змогу виконати кількісний аналіз впливу вхідних параметрів розрахункової моделі на макроскопічні перерізи ТВЗ ВВЕР-1000 унаслідок зміни енергетичного спектра нейтронів, та надалі поліпшити перелік вхідної інформації, щоб найбільш ефективно знизити епістемічну невизначеність. Аналіз чутливості – один із ефективних інструментів оцінки невизначеності, який широко використовується, як засіб кількісної оцінки ефекту вхідних даних та інших параме-

трів на прогнозування результатів розрахунків комп'ютерної моделі. Цей метод, як правило, полягає в знаходженні коефіцієнтів кореляції.

Результатом виконаного аналізу чутливості системи є розрахункові значення коефіцієнтів кореляції. Коефіцієнти кореляції є кількісними показниками статистичного взаємозв'язку між обчисленими результатами (макроскопічних перерізів взаємодії) та вхідними параметрами (теплофізичних властивостей, а саме: T_f , T_{cool} , ρ_{cool} , C_b). Наприклад, рівність коефіцієнта кореляції (Пірсона) одиниці свідчить про лінійну залежність між вхідним та вихідним параметрами – зміна параметру на 1 % спричинить зміну результату на 1 %.

Отже, коефіцієнт кореляції – це прямий показник важливості параметра за допомогою кількісного визначення ефекту змін системи у відповідь на зміну значень вхідних параметрів. У поєднанні із інформацією про невизначеність параметрів, застосування результатів аналізу чутливості є потужним інструментом для оцінки глобальної невизначеності системи, яка спричинена невизначеністю у кількох параметрах.

У статі визначені:

лінійний коефіцієнт кореляції Пірсона (Pearson ordinary correlation);

медіальний коефіцієнт кореляції Блоумквіста (Blomqvist medial correlation);

коефіцієнт рангової кореляції Кендалла (Kendall rank correlation);

коефіцієнт рангової кореляції Спірмена (Spearman rank correlation).

Отримані характеристики чутливості від параметрів, що зумовлюють зміну спектра розподілу щільності потоку нейтронів у розрахунковій чарунці паливної касети ВВЕР-1000, та, відповідно, макроскопічні перерізи взаємодії, наведені в Таблицях 2 – 8.

Зауважимо, що характеристики чутливості вихідних даних від вхідних параметрів (T_{cool} та ρ_{cool}) взаємо обернені, тобто залежні одне від одного, оскільки густина – це функція від температури. Така залежність моделювалась під час генерації варіаційних наборів даних.

Значення більшості коефіцієнтів кореляції (Таблиці 1 – 7) вказують на високий кореляційний зв'язок між вхідними параметрами та макроскопічними перерізами взаємодії, тобто перерізи є чутливими до зміни обраних вхідних параметрів, і це необхідно враховувати під час підготовки бібліотек нейтронно-фізичних перерізів. Один з підходів врахування спектрального ефекту реалізований під час підготовки бібліотек нейтронно-фізичних перерізів взаємодії в форматі PMAXS, що використовується, наприклад, програмою PARCS [6].

Такий підхід передбачає можливість апроксимації нейтронно-фізичних перерізів, що розраховані для декількох різних історій вигорання палива.

Таблиця 2 – Характеристики чутливості коефіцієнту дифузії для швидкої групи від вхідних параметрів

| Коефіцієнт кореляції | D_1 | | |
|----------------------|--------|---------------|--------|
| | T_f | ρ_{cool} | C_b |
| Пірсон | -0,731 | -0,969 | -0,749 |
| Блоумквіст | -0,560 | -0,924 | -0,667 |
| Кендалл | -0,524 | -0,827 | -0,547 |
| Спірмен | -0,706 | -0,958 | -0,757 |

Таблиця 3 – Характеристики чутливості коефіцієнту дифузії для теплової групи від вхідних параметрів

| Коефіцієнт кореляції | D_2 | | |
|----------------------|--------|---------------|--------|
| | T_f | ρ_{cool} | C_b |
| Пірсон | -0,600 | -0,935 | -0,780 |
| Блоумквіст | -0,375 | -0,880 | -0,800 |
| Кендалл | -0,403 | -0,786 | -0,603 |
| Спірмен | -0,545 | -0,929 | -0,802 |

Таблиця 4 – Характеристики чутливості макроскопічного перерізу поглинання для швидкої групи від вхідних параметрів

| Коефіцієнт кореляції | Σ_{a1} | | |
|----------------------|---------------|---------------|-------|
| | T_f | ρ_{cool} | C_b |
| Пірсон | 0,458 | -0,925 | 0,565 |
| Блоумквіст | 0,254 | -0,760 | 0,503 |
| Кендалл | 0,292 | -0,742 | 0,388 |
| Спірмен | 0,433 | -0,915 | 0,573 |

Таблиця 5 – Характеристики чутливості макроскопічного перерізу поглинання для теплової групи від вхідних параметрів

| Коефіцієнт кореляції | Σ_{a2} | | |
|----------------------|---------------|---------------|-------|
| | T_f | ρ_{cool} | C_b |
| Пірсон | 0,554 | -0,631 | 0,701 |
| Блоумквіст | 0,520 | -0,440 | 0,613 |
| Кендалл | 0,395 | -0,408 | 0,508 |
| Спірмен | 0,551 | -0,595 | 0,697 |

Таблиця 7 – Характеристики чутливості макроскопічного перерізу ділення для швидкої групи від вхідних параметрів

| Коефіцієнт кореляції | Σ_{f1} | | |
|----------------------|---------------|---------------|-------|
| | T_f | ρ_{cool} | C_b |
| Пірсон | 0,451 | -0,639 | 0,629 |
| Блоумквіст | 0,309 | -0,440 | 0,619 |
| Кендалл | 0,309 | -0,416 | 0,445 |
| Спірмен | 0,433 | -0,604 | 0,638 |

Таблиця 6 – Характеристики чутливості макроскопічного перерізу уводу нейтронів від вхідних параметрів

| Коефіцієнт кореляції | Σ_{r1-2} | | |
|----------------------|-----------------|---------------|--------|
| | T_f | ρ_{cool} | C_b |
| Пірсон | -0,449 | 0,666 | -0,602 |
| Блоумквіст | -0,339 | 0,564 | -0,533 |
| Кендалл | -0,299 | 0,518 | -0,420 |
| Спірмен | -0,430 | 0,641 | -0,613 |

Таблиця 8 – Характеристики чутливості макроскопічного перерізу ділення для теплової групи від вхідних параметрів

| Коефіцієнт кореляції | Σ_{f2} | | |
|----------------------|---------------|---------------|-------|
| | T_f | ρ_{cool} | C_b |
| Пірсон | 0,610 | -0,625 | 0,748 |
| Блоумквіст | 0,360 | -0,440 | 0,680 |
| Кендалл | 0,421 | -0,403 | 0,538 |
| Спірмен | 0,581 | -0,589 | 0,748 |

Висновки

1. У результаті розрахунків отримано кількісні характеристики невизначеності значень макроскопічних перерізів взаємодії та характеристики чутливості від параметрів, що зумовлюють зміну спектра розподілу щільності потоку нейтронів у розрахунковій чарунці паливної касети ВВЕР-1000.

2. У статті визначений двосторонній 95 % довірчий інтервал зміни макроскопічних перерізів взаємодії упродовж вигорання палива з 95 % ймовірністю. Результати проведеного аналізу вказують на суттєвий вплив спектрального ефекту на невизначеність макроскопічного перерізу ділення та поглинання для теплової групи – відхилення від середнього значення на високих вигораннях може досягати 14 %.

3. Дослідження чутливості розглянутих вихідних даних (D_1 , D_2 , Σ_{a1} , Σ_{a2} , Σ_{r1-2} , Σ_{f1} , Σ_{f2}) від вхідних

параметрів (T_f , T_{cool} , ρ_{cool} , C_b) проводилися на основі оцінки коефіцієнтів кореляції Пірсона, Блоумквіста, Кендалла та Спірмена. Виконаний додатковий аналіз чутливості дав змогу визначити характеристики чутливості від параметрів, що зумовлюють зміну спектра розподілу щільності потоку нейтронів. Значення більшості коефіцієнтів кореляції вказують на високий кореляційний зв'язок між вхідними параметрами та макроскопічними перерізами взаємодії, тобто перерізи є чутливими до зміни обраних вхідних параметрів, і це необхідно врахувати під час підготовки бібліотек нейтронно-фізичних перерізів.

4. У разі неврахування спектрального ефекту великосітковим кодом, надалі необхідно дослідити невизначеності вже нейтронно-фізичних характеристик АкЗ ВВЕР-1000 від спектрального ефекту з метою підвищення ядерної безпеки реакторної установки загалом.

Список використаної літератури

1. HELIOS methods. Studsvik® Scandpower, Version 1.10, April 2008.
2. Kloos M. SUSA – Software for uncertainty and sensitivity analyses, Version 4.0, User's Guide and Tutorial. GRS-P-5, Rev. 1, Garching, 2015.
3. Kloos M. The tool SUSA 4 for probabilistic uncertainty and sensitivity analyses. UNCECOMP 2015. 1st ECCOMAS Thematic Conference on International Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering, Crete Island, Greece, 25–27 May 2015.
4. International Atomic Energy Agency. Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation. Safety Reports Series No. 52. Vienna: IAEA, 2008.
5. International Atomic Energy Agency. Deterministic safety analysis for nuclear power plants. Specific Safety Guide No. SSG-2. Vienna: IAEA, 2009.
6. Collins Y. Xu, B., Downar T. GENPMAXS v. 9: Program for Generating the PARCS Cross Section Interface File PMAXS. UM-NERS-09-004. October, 2009.

References

1. HELIOS methods. Studsvik® Scandpower, Version 1.10, April 2008.
2. Kloos, M. (2015). SUSA – Software for uncertainty and sensitivity analyses, Version 4.0, *User's Guide and Tutorial*. GRS-P-5, Rev. 1, Garching.
3. Kloos, M. (2015). The tool SUSA 4 for probabilistic uncertainty and sensitivity analyses. UNCECOMP 2015. 1st ECCOMAS Thematic Conference on International Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering, Crete Island, Greece.
4. International Atomic Energy Agency. Best estimate safety analysis for nuclear power plants: uncertainty evaluation. *Safety Reports Series No. 52*. Vienna, IAEA, 2008.
5. International Atomic Energy Agency. Deterministic safety analysis for nuclear power plants. *Specific Safety Guide No. SSG-2*. Vienna, IAEA, 2009.
6. Xu, Y., Downar, T. (2009). GENPMAXS v. 9: Program for generating the PARCS cross section interface file PMAXS. UM-NERS-09-004.

Uncertainty Analysis of WWER-1000 Core Macroscopic Cross Sections due to Spectral Effects

Kukhotska O., Ovdiienko I., Ieremenko M.

State enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

The paper presents the results of uncertainty analysis of WWER-1000 core macroscopic cross sections due to spectral effects during WWER-1000 fuel burnup and the analysis of cross section sensitivity from thermophysical parameters of the calculated cell, which affect energy spectrum of neutron flux density.

The calculation of changes in the isotopic composition during burnup and the preparation of macroscopic cross sections used the developed HELIOS computer model [1] for TVSA, which is currently operated at most Ukrainian WWER-1000 units.

The GRS approach applying Software for Uncertainty and Sensitivity Analyses (SUSA) [2] was chosen to assess the uncertainty of the macroscopic cross sections due to spectral effects and analysis of cross section sensitivity from thermophysical parameters. The spectral effect on macroscopic cross sections was taken into account by calculating the fuel burnup for variational sets of thermophysical parameters (fuel temperature, coolant temperature and density, boric acid concentration) prepared in advance by the SUSA program, as a result of which fuel isotopic composition vectors were obtained. After that, neutronic constants for the reference state were developed for each of the sets of isotopic composition, which corresponded to a certain set of thermophysical parameters.

At the next stage, the uncertainty of macroscopic cross sections of the interaction due to the spectral effects on the isotopic composition of the fuel was analyzed using SUSA 4, followed by the analysis of cross section sensitivity from thermophysical parameters of the calculated cell affecting energy spectrum of neutron flux density. In the future, the uncertainty of two-group macroscopic diffusion constants can be used to estimate the overall uncertainty of neutronic characteristics in large-grid core calculations, in particular, in the safety analysis.

Keywords: uncertainty of macroscopic cross sections, spectral effect, WWER, HELIOS, SUSA.

Отримано 21.09.2020.