#### УДК 621.039.50

### В.В. Гальченко, А.А. Мішин, Н.М. Рабченюк

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДОПУСКІВ І ПОСАДОК ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТВЗА ВВЕР-1000 НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЇ ЗОНИ В СТАЦІОНАРНИХ І ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ

The paper under scrutiny studies the approach of reasonable increase or decrease of multiplication and/or absorption features of fuel and control rods taking into account the fuel assembly bias and manufacturing tolerances. Based on defining conservative initial and boundary conditions, the NPP accident studies are analyzed using this approach. Conservative initial conditions are limiting values (deviations) of reactor systems and equipment parameters defined by the reactor facility design or operational conditions. Hence we choose only those values of parameters which result in the worst consequences for fulfilling the acceptability criteria of the considered initial event. Nowadays defining conservative initial conditions for codes solving thermohydraulic issues is quite well-grounded. However, establishing conservative parameters for 3D core kinetics codes turns out to be rather troublesome since neutron-physical parameters are calculated by the code itself depending on the input data. The possibility of establishing conservative initial conditions deal with preparing few-group macroscopic cross-sections. The research results show the fundamental possibility of influence of bias and manufacturing tolerances at TVS producing on its multiplication features.

### Вступ

Характеристики палива, які надаються заводом-виробником, включають у себе величини допусків і посадок на виготовлення оболонок тепловидільних елементів (твел), паливних таблеток, розміру тепловидільної збірки (ТВЗ) "під ключ", маси палива в ТВЗ тощо. Врахування допусків і посадок активно використовується при проведенні аналізу критичності систем поводження з відпрацьованим ядерним паливом. При розрахунку кампанії реактора, а також при проведенні аналізу різних перехідних режимів роботи реакторної установки відхилення на виготовлення палива і стрижнів системи управління і захисту (СУЗ) не розглядаються в процесі підготовки макроскопічних перерізів взаємодії.

Консерватизм — це рівень нашого незнання про перебіг процесу, що досліджується. Тому, формуючи консервативні початкові та граничні умови, ми з певною імовірністю стверджуємо, що в реальності процес протікатиме "м'якіше", ніж це передбачено в результаті розрахунків.

Але це буде правдою лише в тому випадку, якщо рівень консерватизму є обґрунтованим. Припущення, які ми робимо при формуванні розрахункової схеми, початкових і граничних умов, не мають бути "відірваними" від об'єкта і процесу, що досліджуються.

Консерватизм при формуванні початкових і граничних умов для теплогідравлічних параметрів реакторної установки є досить обґрунто-

ваним. Це стосується і збільшення потужності до 104 % від номінальної та збільшення/зменшення витрат теплоносія через реактор, збільшення/зменшення тиску теплоносія тощо. Зазвичай таке обґрунтування лежить у закладених проектних характеристиках установки та точності визначення і підтримки названих параметрів. І хоча на сьогодні, наприклад, рівень визначення та підтримки потужності є вищим за зазначений, ми продовжуємо використовувати саме таку величину, оскільки вона, по-перше, зафіксована в проекті для енергоблока, а подруге, впевнено дає можливість вважати енергетичну напруженість активної зони для реального перехідного процесу меншою, якщо такий матиме місце. Те ж саме стосується й інших параметрів реакторної установки.

З точки зору кінетики реактора, консервативній обробці піддаються параметри точкової кінетики. Але якщо вести мову про завдання консервативних параметрів вхідного стану для розрахунків з використанням тривимірної кінетики активної зони, то виникають певні складнощі, які не дають можливості обґрунтовано збільшувати або зменшувати макроскопічні характеристики взаємодії.

Питання коректної підготовки малогрупових перерізів взаємодії є важливою і актуальною задачею, а дослідження з цього питання мають системний характер [1–4]. У той же час дослідження формування консервативних початкових даних для аналізу перехідних процесів з використанням кодів тривимірної кінетики такої систематики не мають. Певні ідеї з цього приводу можна знайти в працях, присвячених підготовці макроскопічних констант, у працях з валідації відповідних програмних засобів та в інших дослідженнях (наприклад, у [5]).

# Постановка задачі

У роботі пропонується розглянути можливість підготовки консервативних макроскопічних перерізів взаємодії з використанням допусків і посадок на виготовлення палива і поглиначів. Для цього необхідно дослідити вплив кожного допуску окремо, визначити комбінації допусків, які найістотніше впливають на розмножувальні та поглинальні властивості ТВЗ, розглянути можливий вплив ТВЗ із такими характеристиками на поле енерговиділення реактора, "вагу" ОР СУЗ.

### Характеристики тепловидільних збірок альтернативної конструкції (ТВЗА)

Розглянемо одну з можливостей обґрунтовано збільшувати або зменшувати розмножувальні і/або поглинаючі властивості палива і стрижнів СУЗ – врахування допусків і посадок на виготовлення ТВЗ. Проектні характеристики ТВЗА та стрижнів СУЗ з відповідними значеннями відхилень величин взято з [6]. Геометричні характеристики ТВЗА, які використовувалися як "базові" при розрахунку малогрупових макроскопічних перерізів взаємодії, приведено в [7]. В табл. 1 наведено параметри паливного елемента ТВЗА, які піддавалися обробці, та величини інтервалів зміни відповідних характеристик.

*Таблиця* 1. Параметри паливного елемента ТВЗА ВВЕР-1000, які піддавалися обробці, та діапазон їх зміни

Параметр	Величина відхилення
Внутрішній діаметр палива, мм	0,2
Зовнішній діаметр палива, мм	0,03
Внутрішній діаметр оболонки, мм	0,01
Зовнішній діаметр оболонки, мм	0,03

Розглядалися ті типи ТВЗА, які використовуються на сьогодні на енергоблоках АЕС з водо-водяними енергетичними реакторами (BBEP) в Україні.

Оскільки маса палива напряму в таких розрахунках не враховується, то допуски на масу

палива перераховувалися в збагачення. Якщо консервативно вважати, що вся надлишкова маса палива —  $^{235}$ U, то допуск у 5 кг UO<sub>2</sub> приблизно (залежно від початкового збагачення палива по  $^{235}$ U) відповідає 4,4075 кг металевого U, що відповідатиме зміні збагачення по  $^{235}$ U на рівні 0,04477 %. Приведена величина допуску на збагачення незначним чином варіюватиметься залежно від величини початкового збагачення палива по  $^{235}$ U. Для зручності рівень допуску на збагачення палива в розрахунках для всіх початкових збагачень покладався 0,05 %.

Оскільки допуски на виготовлення ПЕЛ у базах даних не відображено, то для зміни "ваги" стрижня СУЗ, крім допусків на виготовлення палива і його оболонки, варіювався матеріал поглинача. Розглядалися три типи ПС СУЗ:

поглинаючий матеріал B<sub>4</sub>C – по всій висоті;

поглинаючий матеріал Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TiO<sub>2</sub> – по всій висоті;

• поглинаючий матеріал B<sub>4</sub>C+Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·TiO<sub>2</sub> з урахуванням розподілу матеріалу по висоті.

# Визначення комбінації параметрів для отримання "максимальних" і "мінімальних" розмножувальних властивостей ТВЗ

Вплив величини кожного допуску на розмножувальні властивості системи з урахуванням вигоряння палива розглядався окремо. Для цього було внесено певні зміни в розрахункову схему ТВЗ для коду WIMSD5B [8, 2]. Після цього формувалась комбінація, яка приводила до максимальних або мінімальних розмножувальних властивостей системи.

Таблиця	2.	Вплив	допусків	на	розмножувальні
властиво	ост	i TB3			

Парамотр	Відхилення/	Тенденція	
Параметр	діапазон	в $k_{ m e \varphi}$	
Внутрішній діаметр	min /may	+ / -	
палива	mm/max		
Зовнішній діаметр	min /may	- / +	
палива	IIIII/IIIax		
Початкове	0.05/±0.05		
збагачення, %	-0,03/+0,03	- / Ŧ	
Внутрішній діаметр	min (mor	/ 1	
оболонки	mm/max	— / <del>+</del>	
Зовнішній діаметр	min/may	± /	
оболонки	mm/max	· / =	

Комбінації допусків, які приводять до максимальних/мінімальних розмножувальних властивостей ТВЗ, наведено в табл. 2. Тут min мінімально можлива величина, а max, відповідно, — максимально можливе значення параметра з урахуванням допусків і посадок на виготовлення. Важливо відзначити, що при зміні внутрішнього діаметра оболонки розмножувальні властивості змінюються неістотно, але для цілісності загальної картини тенденцію було збережено.

Таким чином, у результаті проведених розрахунків були сформовані комбінації параметрів ТВЗ, які приводять до максимальних і мінімальних розмножувальних властивостей, а також комбінації параметрів ТВЗ і ПЕЛ, які приводять до максимальних і мінімальних поглинаючих характеристик ПЕЛ.

На рис. 1 приведено відхилення коефіцієнта розмноження нейтронів від "базового" розрахунку. З рисунка видно, що відхилення від "базового" розрахунку, маючи на початку кампанії майже сталий характер, відчутно зростають в міру вигоряння палива. В наведеному розрахунку не бралася до уваги зміна густини палива. Вплив допусків при виготовленні палива на коефіцієнт розмноження нейтронів має адитивний характер. Як видно з рис. 2, додаткове врахування густини палива збільшить коефіцієнт розмноження нейтронів ще на ~0,6 % при високій глибині вигоряння палива.

На рис. 3 показано характер відхилення коефіцієнта розмноження нейтронів від "базового" розрахунку для комбінації параметрів, які приводять до мінімальних і максимальних поглинаючих властивостей ПЕЛ.

Таким чином, відхилення впродовж приблизно першої третини кампанії палива мають майже стале значення на рівні до 0,5 % "базового", надалі спостерігається тенденція до зрос-



Рис. 2. Відхилення коефіцієнта розмноження при зміні густини палива від "базового" значення: *1* – густина палива 10,45 г/см<sup>3</sup>; *2* – густина палива 10,75 г/см<sup>3</sup>



Рис. 3. Характер відхилення коефіцієнта розмноження нейтронів від "базового" значення



Рис. 4. Залежність коефіцієнта розмноження від вигоряння палива з урахуванням різних матеріальних композицій поглинача: *I* – поглинаючий матеріал B<sub>4</sub>C; *2* – комбінований поглинаючий матеріал B<sub>4</sub>C + Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·TiO<sub>2</sub>; *3* – поглинаючий матеріал Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·TiO<sub>2</sub>

тання з глибиною вигоряння палива до 0,8 %. Необхідно зазначити, що при використанні борного поглинача одним із можливих факторів впливу на поглинальні властивості є варіювання концентрацією <sup>10</sup>В у природній суміші ізотопів. Виходячи з того, що  $B^{nat} = (19,9\% \pm 0,7\%)B^{10} + (80,1\% \pm 0,7\%)B^{11}$ , можливе врахування 19,2 або 20,6% <sup>10</sup>В. У наведених дослідженнях така можливість не використовувалася, оскільки версія програмного продукту WIMSD5B з бібліотекою WL'1986' [9] такої варіації не надає.

На рис. 4 наведено залежність зміни коефіцієнта розмноження нейтронів з вигорянням палива для різних матеріальних композицій поглинача.

3 рис. 4 видно, що різниця у "вазі" СУЗ з борним поглиначем і комбінованим  $B_4C + Dy_2O_3TiO_2$  не істотна і зменшується зі збільшенням вигоряння палива. Це пояснюється тим, що мікроскопічний переріз поглинання нейтронів з енергією 0,0253 еВ для диспрозію становить 950 барн, а у бора природної концентрації – 755 барн. З урахуванням відносно невеликого шару  $TiO_2 \cdot Dy_2O_3$  (300 мм) порівняно з  $B_4C$ (3200 мм) ядерна концентрація диспрозію значно менша за ядерну концентрацію бору і, як наслідок, меншим є значення макроскопічного перерізу. В результаті цього така домішка на "вагу" стрижня СУЗ істотно не вплине.

### Розрахунки з використанням Dyn3D

У результаті першого етапу було сформовано відповідні набори макроскопічних перерізів взаємодії, які використовувалися як вхідні дані в комп'ютерному коді Dyn3D [10] для тривимірних розрахунків активної зони в стаціонарному та перехідних процесах. Розрахункову схему активної зони BBEP-1000 для зазначеного коду було представлено на 7-й Міжнародній науково-технічній конференції "Забезпечення безпеки AEC" [7].

На рис. 5 наведено картограму покасетного розподілу відносного енерговиділення на початок і кінець кампанії по бору. Розрахунки виконано за допомогою різних комп'ютерних



Рис. 5. Картограма покасетного розподілу відносного енерговиділення на початок і кінець кампанії по бору



Рис. 6. Деформація поля енерговиділення при підстановці в центральну ТВЗ (ТВЗ № 1) "максимальних" розмножувальних властивостей

кодів для сектора симетрії 60°. Наведений розподіл енерговиділення було отримано з використанням "базових" геометричних характеристик ТВЗ, що є загальною практикою.

Припустимо, що відхилення технологічних допусків підпорядковано гауссовому розподілу

[11], тоді ймовірність появи в активній зоні хоча б однієї касети із вказаними комбінаціями, які призводитимуть до максимальних/мінімальних розмножувальних властивостей, не перевищуватиме 0,135 %. Оскільки основним постачальником палива для АЕС України є російська корпорація "ТВЕЛ", а паливо ВВЕР-1000 виробляється на одному заводі, то можна вважати, що ймовірнісні показники для різних енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 змінюватися не будуть. Тому для десяти активних зон і десяти паливних кампаній (ТВЗА експлуатується в Україні саме стільки) така імовірність сягне 13,5%, що є вже досить відчутним значенням.

З урахуванням цього для центральної касети було підставлено набір макроскопічних характеристик, які відповідають максимальним (мінімальним) розмножувальвластивостям для ним такого типу ТВЗ. На рис. 6 наведена картограма покасетного розподілу відносного енерговиділення при підстановці в центральну ТВЗ (ТВЗ № 1) макроскопічних перерізів взаємодії, що відповідають "максимальним" розмножувальним властивостям.

3 рис. 6 видно, що збільшення енерговиді-

лення в цій касеті і в сусідніх з нею є незначним — на рівні до 2 %. Це збільшення перебуває на рівні статистичної еквівалентності і принципового характеру не має. Такий неістотний вплив є свідченням стійкості системи до



Рис. 7. Деформація поля енерговиділення при підстановці "максимальних" розмножуючих властивостей у 19 ТВЗ



Рис. 8. Ефективність аварійного захисту (без урахування одного кластера) для різного набору макроскопічних характеристик: 1 – максимальна "вага" СУЗ; 2 – "базові" характеристики СУЗ; 3 – мінімальна "вага" СУЗ

зазначених комбінацій параметрів і коректності формування макроскопічних перерізів взаємодії з використанням "базових" характеристик для стаціонарних задач, якими є розрахунки кампанії реактора. Але збільшення енерговиділення і температури палива наявне як в касеті, для якої модифіковано значення перерізів, так і в сусідніх з нею касетах.

При підстановці в активну зону 19 ТВЗ з максимальними розмножувальними властивос-

тями (ТВЗ типу 398GO, повне завантаження такими ТВЗ для наведеного паливного циклу) ситуація дещо "покращується". Як видно з рис. 7, збільшення енерговиділення відбувається на рівні до 3 %, а концентрація борної кислоти в теплоносії (для отримання  $k_{e\phi} = 1$ ) збільшується з 6,12 до 6,18 г/кг.

Значно відчутніше зміна макроскопічних характеристик відображається на ефективності стрижнів СУЗ. Як видно з рис. 8, сумарна ефективність всіх стрижнів СУЗ ("вага" АЗ) може змінюватися до 10 % базового значення (дані на рисунку лише для

випадку ОР СУЗ з борного поглинача).

Незважаючи на незначний ефект, пов'язаний зі зміною розмножувальних властивостей системи при зміні характеристик палива, пов'язаних із врахуванням допусків на виготовлення ТВЗ, аналіз аварії "Неконтрольований рух вгору кластеру робочої групи ОР СУЗ" показав додаткове збільшення температури палива максимально енергонавантаженої ТВЗ з 1452 до 1548 °C.

### Висновки

Проведені дослідження показали принципову можливість впливу допусків на виготовлення

ТВЗ для варіювання її розмножувальними властивостями. Такий підхід дасть можливість обґрунтовано збільшувати нейтронно-фізичні й теплотехнічні характеристики ТВЗ та разом зі зміною теплотехнічних характеристик збільшити консерватизм у результатах при виконанні аналізу аварій, пов'язаних зі зміною реактивності та перерозподілу енерговиділення для AEC із BBEP. У наведених результатах не враховано зміни густини палива, крім того, для ТВЗ із максимальними розмножувальними властивостями можна, при підготовці макроскопічних характеристик, зануляти концентрацію <sup>135</sup>Хе на кожному кроці з вигоряння.

- Гальченко В.В., Неделин О.В. Сравнительный анализ подготовки малогрупповых констант с использованием различных компьютерных кодов. Часть 1 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2003. – 6, вып. 3. – С. 61–68.
- 2. Гальченко В.В. Сравнительный анализ подготовки данных с использованием различных компьютерных кодов. Часть 2 // Там же. 2007. 7, № 3-4. С. 29–42.
- Кучин А.В., Овдиенко Ю.Н., Халимончук В.А. Моделирование расчетного бенчмарка AER для топливной кассеты реактора BBCP-440, содержащей гадолиний, с помощью программы HELIOS // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. – Вип. 2. – С. 7–12.
- Исследование влияния приближений расчетной модели на изменение температурного коэффициента реактивности в ячейке, топливной сборке реактора типа LWR в процессе выгорания топлива / А.Д. Климов, В.Д. Давиденко, В.Ф. Цибульский, С.В. Цибульский // Матер. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 17–20 мая 2011, ОКБ "Гидропресс", Подольск, РФ. – Подольск, 2011.
- Новый подход к определению минимально достаточной эффективности аварийной защиты ВВЭР / Г.Л. Пономаренко, С.Б. Рыжов, М.А. Быков, Д.Н. Ермаков //

Рекомендована Радою теплоенергетичного факультету НТУУ "КПІ" Проте вже можна говорити, що в подальшому для розрахунку перехідних процесів у рамках робіт, пов'язаних з імовірнісним аналізом безпеки, запропонований підхід можна використовувати для обґрунтованого варіювання розмножувальними та/або поглинаючими характеристиками палива і поглинача нейтронів.

Атомная энергия. – 2006. – **100**, вып. 3. – С. 184– 196.

- 43-923.203.007.БД.02-09.Ред.1.Ф. Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 2. Отчет по анализу безопасности. Глава 15. Анализ проектных аварий. База данных по ЯППУ. – КИЭП, 2003.
- Гальченко В.В., Рабченюк Н.Н., Сапожников Ю.А. Сравнение результатов расчетов реактивностных аварий с использованием различных компьютерных кодов // Матер. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЕС с ВВЕР", 17–20 мая 2011 г., ОКБ "Гидропресс", Подольск, РФ. Подольск, 2011.
- 8. J.R. Askew et al., "A general description of the lattice code WIMS", J. of the British Nuclear Energy Society, vol. 5, no. 1, pp. 564–584, 1966.
- 9. *M.J. Halsall and C.J. Taubman*, The WIMS '1986' Nuclear Data Library, AEEW-R 2133, 1986.
- U. Grundmann et al., DYN3D Version 3.2. Code for Calculation of Transients in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements. Forschungszentrum, Rossendorf, Germany: Institute of Safety Research, August 2005, pp. 9–68.
- L.S. Tong, Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors, 2<sup>nd</sup> ed., L.S. Tong and J. Weisman, Eds. LaGraange Park, I11: ANS, 1979, p. 418.

Надійшла до редакції 30 квітня 2012 року