

В. І. Борисенко^{1,2}, Ю. Ф. Піонтковський²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. акад. Глушкова, 4, Київ, 03022, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ В МОНТЕ-КАРЛО КОДАХ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ДЕТЕКТОРА ПРЯМОГО ЗАРЯДУ У ВВЕР-1000

Стаття присвячена порівнянню результатів числового моделювання в Монте-Карло кодах SERPENT та MCNP елемента активної зони ВВЕР-1000. Модель являє собою сім тепловиділяючих збірок (ТВЗ) - центральна ТВЗ, навколо якої знаходяться шість сусідніх ТВЗ та детектор прямого заряду (ДПЗ), розміщений у центральному каналі центральної ТВЗ. Проводилися визначення та порівняння внесків тепловиділяючих елементів (твелів) з усіх семи ТВЗ у сигнал ДПЗ, а також локальна чутливість детектора та вплив зміни параметрів активної зони ВВЕР-1000 (концентрація борної кислоти та температура теплоносія 1-го контура, вигорання палива та ін.) на сигнал ДПЗ. Результати, отримані в кодах MCNP та SERPENT, демонструють, що сигнал ДПЗ на ~ 70 % формується нейтронами, що генеруються твелами ТВЗ, в яку встановлено детектор, зокрема: при збільшенні концентрації борного поглиначу в теплоносії 1-го контура внесок сусідніх ТВЗ зменшується, а при підвищенні температури теплоносія внесок у сигнал ДПЗ від сусідніх ТВЗ збільшується.

Ключові слова: детектор прямого заряду, активація родієвого емітера, вигорання родієвого емітера, відновлення енергорозподілу, канал нейтронних вимірювань.

Продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк, використання палива різних постачальників та плани по використанню ВВЕР-1000 в маневреному режимі вимагають більш надійного контролю важливих для безпеки параметрів активної зони (АкЗ) реактора. Одним із таких параметрів, що характеризує безпечність експлуатації ядерного палива у ВВЕР-1000, є лінійне енерговиділення (ЛЕВ) твелів.

Здійснення контролю ЛЕВ забезпечується системою внутрішньореакторного контролю (СВРК). До складу СВРК входять 64 канали нейтронних вимірювань (КНВ), кожен КНВ складається з семи рівномірно розташованих по висоті каналу ДПЗ (крок розташування ДПЗ по висоті 437,5 мм). За показаннями ДПЗ здійснюється відновлення ЛЕВ твелів в АкЗ реактора. Задача визначення ЛЕВ у СВРК нового покоління є надзвичайно важливою у зв'язку з розширенням номенклатури використовуваних видів палива при формуванні паливних завантажень, а також плани експлуатації ВВЕР-1000 в маневреному режимі.

ДПЗ ВВЕР-1000 складається з родієвого емітера (дріт діаметром ~ 0,5 мм та довжиною 250 мм), навколо якого знаходиться колектор (коаксіальний циліндр зі сталі), а простір між емітером та колектором заповнений діелектриком (зазвичай це оксид алюмінію) [1]. Усе це знаходиться в чохлі, що захищає детектор від контакту з теплоносієм. Нейтронно-чутлива частина детектора – емітер, на ядрах якого відбувається реакція радіаційного захоплення з подальшою емісією електрона (рис. 1). Електрони проходять через ізолятор і збираються на колекторі, даний заряд буде пропорційний густині нейтронного потоку в місці, де розташований даний детектор. Далі за допомогою програмного забезпечення СВРК відбувається відновлення ЛЕВ твелів ТВЗ.

Сигнал ДПЗ, який формується в емітері під час реакції радіаційного захоплення нейтронів, має бути захищений від гамма-випромінювання самого детектора, тому між детектором та кабелем встановлено захисний екран. Для врахування струму, що виникає в сигнальних кабелях під дією гамма-випромінювання продуктів розпаду палива, використовують додатковий кабель - фонову жилу детектора. Струм, що виникає на цій жилі, враховують у сигналі детектора.

У тепловому спектрі для реакції радіаційного захоплення на ядрах ^{103}Rh відкриті два канали, а саме: канал із мікроперерізом захоплення ~ 11 б ^{103}Rh перейде в $^{104\text{m}}\text{Rh}$ метастабільний стан із періодом напіврозпаду $T_{1/2} = 4,4$ хв та основний канал із мікроперерізом захоплення ~ 139 б ^{103}Rh перейде в ^{104}Rh , який є β -активним із $T_{1/2} = 44$ с.

Зрозуміло, що сигнал ДПЗ залежатиме від спектра нейтронів, що попадають в об'єм емітера, та макроперерізу захоплення нейтронів ^{103}Rh . На спектр нейтронів впливатимуть такі фактори, як тип палива, його збагачення та вигорання, накопичення продуктів поділу, а також параметри АкЗ - концентрація борної кислоти та температура теплоносія 1-го контура. Сигнал ДПЗ, а також макроперерізу захоплення нейтронів ядрами емітера залежатиме від його вигорання.

© В. І. Борисенко, Ю. Ф. Піонтковський, 2018

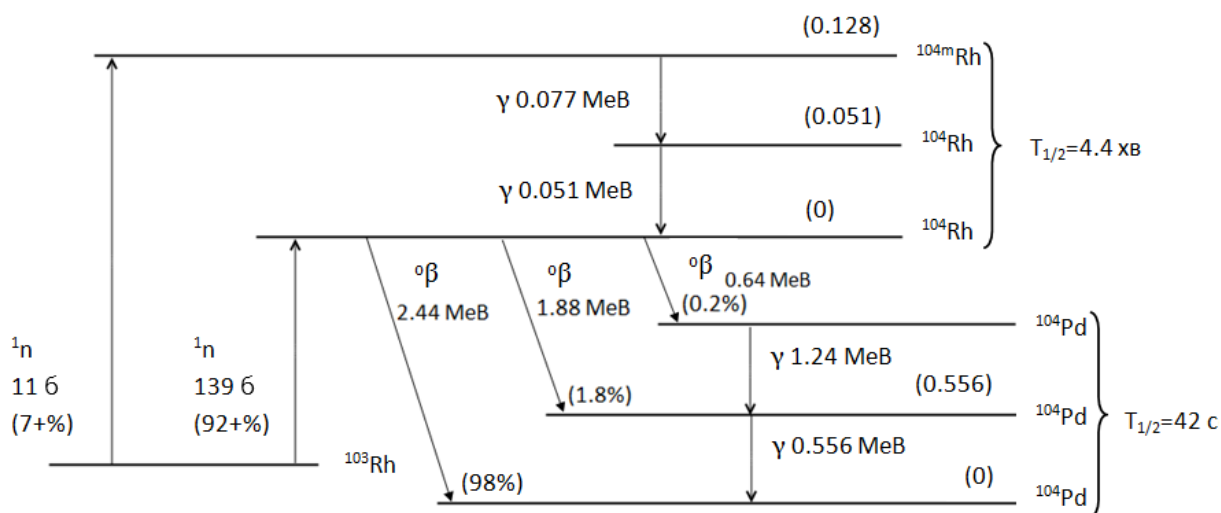


Рис. 1. Схема активації ядер родію.

Як бачимо, для достовірного відновлення енергорозподілу в активній зоні необхідно врахувати низку факторів. Метод Монте-Карло дозволяє вирішити цю задачу з високою точністю, це підтверджується тим, що дані, отримані цим методом, у світі визнаються як реперні для порівняння з іншими методиками [2 - 4]. Для дослідження особливостей формування спектра нейтронів в АкЗ, що попадають у чутливий об'єм детектора, та впливу зміни параметрів АкЗ на сигнал ДПЗ було здійснене числове моделювання в кодах MCNP та SERPENT елемента АкЗ ВВЕР-1000. Порівняння результатів моделювання цих двох кодів необхідне для верифікації розроблених моделей, а також пов'язане з тим, що код SERPENT використовується у програмному забезпеченні нових СВРК-М2 [5].

Моделі для числових розрахунків. У кодах MCNP та SERPENT було розроблено моделі, що представляють собою сім ТВЗ ВВЕР-1000 (рис. 2), які знаходяться в теплоносії, параметри якого змінювалися для різних розрахункових станів (температура та концентрація борної кислоти).

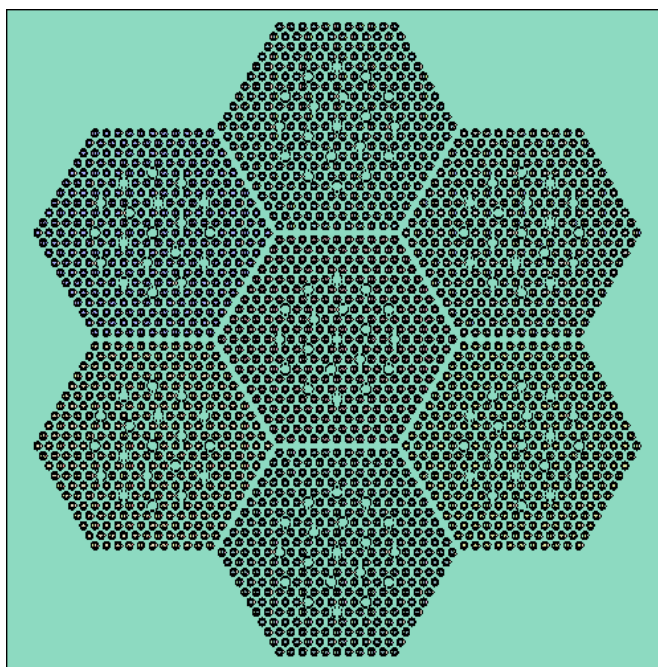


Рис. 2. Загальний вигляд (зверху) розрахункової моделі.

ДПЗ знаходиться в центральному каналі центральної ТВЗ (рис. 3 та 4). Направляючі канали органів системи управління захисту заповнені водою.

Розміри всіх елементів у моделях та їхні характеристики відповідають реальним значенням ТВЗ та ДПЗ що використовуються на реакторах ВВЕР-1000.

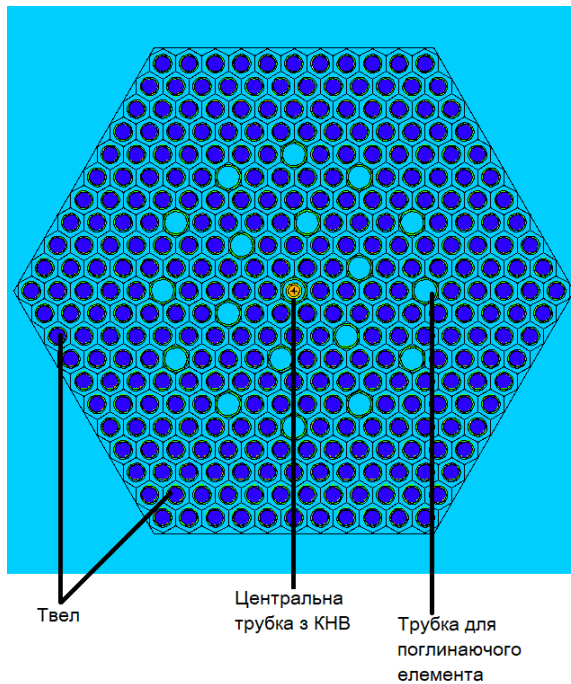


Рис. 3. ТВЗ із встановленим у центральний канал ДПЗ, вигляд зверху.

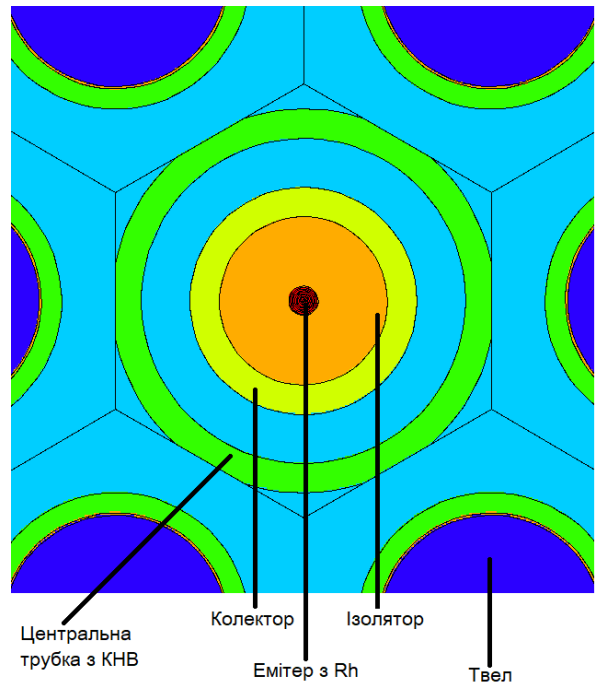


Рис. 4. Центральний канал із ДПЗ у збільшеному масштабі, вигляд зверху.

Метою розрахунків на даних моделях є дослідження впливу параметрів теплоносія на процес активації родієвого емітера під впливом нейтронного потоку.

Результати. Розрахунки показали, що сигнал детектора формується в основному твелями в центральній ТВЗ, результати внеску в сигнал від ТВЗ наведено в таблиці, де T – температура теплоносія ($^{\circ}C$), C – концентрація борної кислоти в ньому ($г/кг$).

Порівняння результатів внеску ТВЗ в сигнал ДПЗ в кодах MCNP та SERPENT, %

Розташування ТВЗ	Параметри теплоносія				Код
	$T = 290, C = 0$	$T = 290, C = 5$	$T = 320, C = 0$	$T = 320, C = 5$	
Центральна ТВЗ	69,1	72,0	67,9	69,2	SERPENT
Сусідні ТВЗ	30,1	28,0	32,1	30,8	
Центральна ТВЗ	68,6	70,1	66,5	67,9	MCNP
Сусідні ТВЗ	31,4	29,9	33,5	32,1	

Збільшення відносного внеску центральної ТВЗ у сигнал ДПЗ при більших значеннях концентрації борної кислоти зумовлене збільшенням макроперерізу поглинання теплоносія. Відповідно і для нейтронів, що вилітають із сусідніх ТВЗ, більша можливість бути поглинутими в теплоносії. Зменшення відносного внеску в сигнал від сусідніх збірок пов'язане теж зі зміною макроперерізу поглинання та розсіяння нейтронів на ядрах теплоносія.

Враховуючи симетрію даної задачі, на діаграмах нижче буде наведено потвельний внесок у сигнал детектора від 60° сектора симетрії ТВЗ, в яку встановлено ДПЗ, де самий верхній ряд твелів – периферійний ряд, що межує із сусідньою збіркою, а нижній ряд (з одним твелем) – ряд, що оточує центральну трубку з детектором.

На рис. 5 та 6 показано відносний внесок у сигнал ДПЗ від твелів ТВЗ, в яку встановлено детектор при концентрації борної кислоти $0 г/кг$ і температурі теплоносія $290^{\circ}C$, розрахований у кодах

SERPENT та MCNP відповідно. Як видно з діаграм, центральний ряд твелів (що оточують КНВ) дає найбільший внесок у сигнал. Хоча периферійні ряди мають значно менший внесок у порівнянні з центральними, але він все ще залишається суттєвим і тому при відновленні ЛЕВ необхідно враховувати не лише шість твелів навколо детектора, як це робиться в існуючих СВРК, а й інші ряди ТВЗ.

На рис. 7 та 8 показано відносний внесок у сигнал ДПЗ від твелів ТВЗ, в яку встановлено детектор при концентрації борної кислоти 5 г/кг і температурі теплоносія 290 °С. Порівнюючи із внеском при відсутності борного поглиначача, видно, що внесок центрального ряду твелів зростає, а периферійних відповідно зменшується, як було описано раніше. Це пов'язано зі більшою ймовірністю бути поглинутими ядрами бору нейтронам, які вилітають із периферійних рядів.

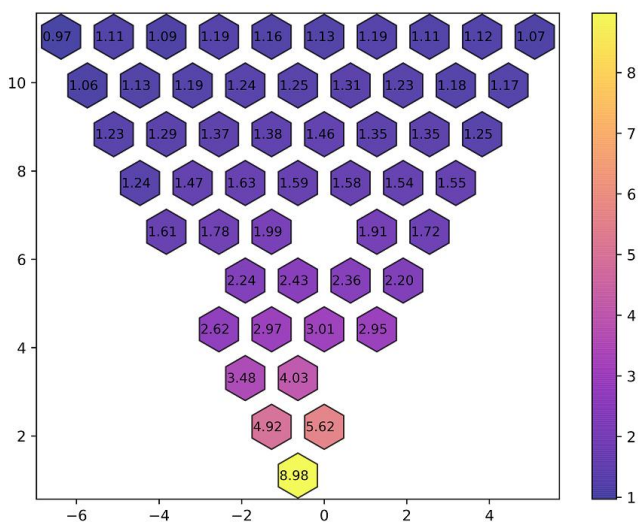


Рис. 5. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. SERPENT (0 г/кг, 290 °С).

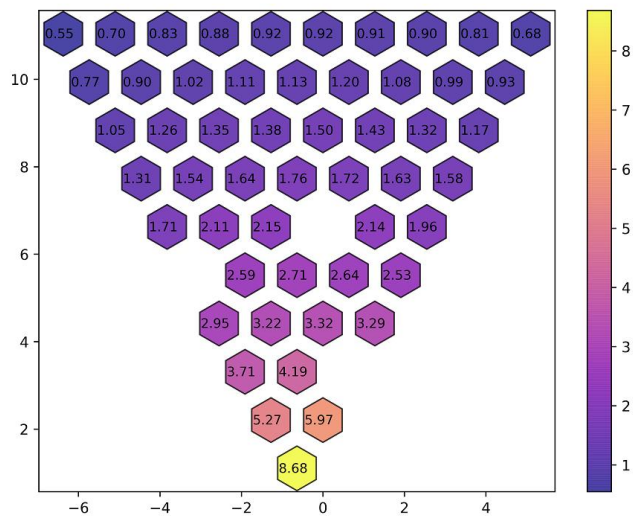


Рис. 6. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. MCNP (0 г/кг, 290 °С).

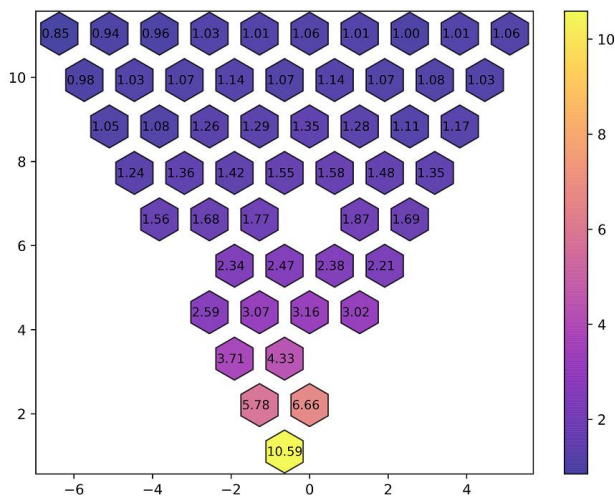


Рис. 7. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. SERPENT (5 г/кг, 290 °С).

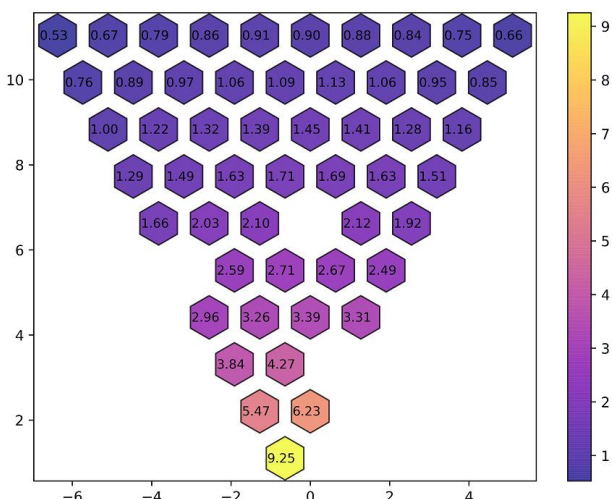


Рис. 8. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. MCNP (5 г/кг, 290 °С).

На рис. 9 та 10 наведено результати відносного внеску в сигнал ДПЗ від твелів центральної ТВЗ при температурі теплоносія 320 °С і концентрації борної кислоти 0 г/кг. На рис. 11 та 12 наведено результати відносного внеску в сигнал ДПЗ від твелів центральної ТВЗ при температурі теплоносія 320 °С і концентрації борної кислоти 5 г/кг. Як видно, зміна температури призводить до зміни макроперерізів поглинання та розсіяння теплоносія, що впливає на кількість реакцій радіаційного поглинання на ядрах емітера і відповідно викликає зміну сигналу ДПЗ.

Результати моделювання демонструють, що дані, отримані в Монте-Карло кодах MCNP та SERPENT, добре між собою узгоджуються і показують однакову функцію відгуку ДПЗ при зміні параметрів АкЗ реактора.

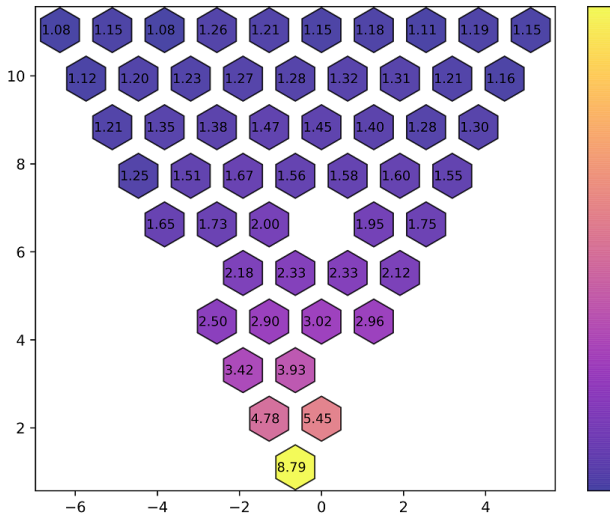


Рис. 9. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. SERPENT (0 г/кг, 320 °С).

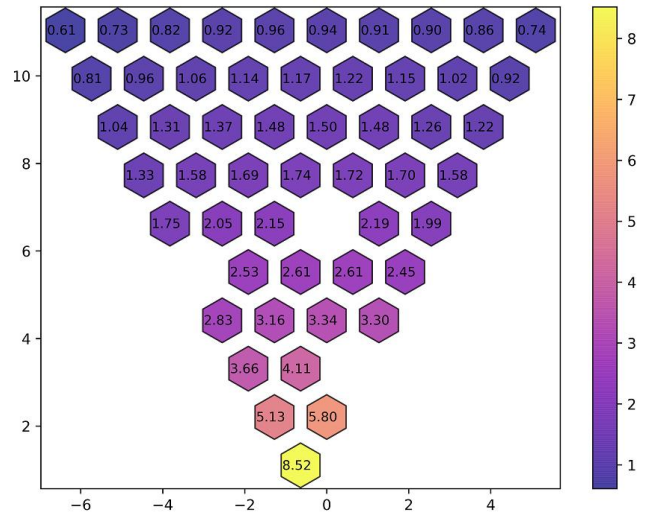


Рис. 10. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. MCNP (0 г/кг, 320 °С).

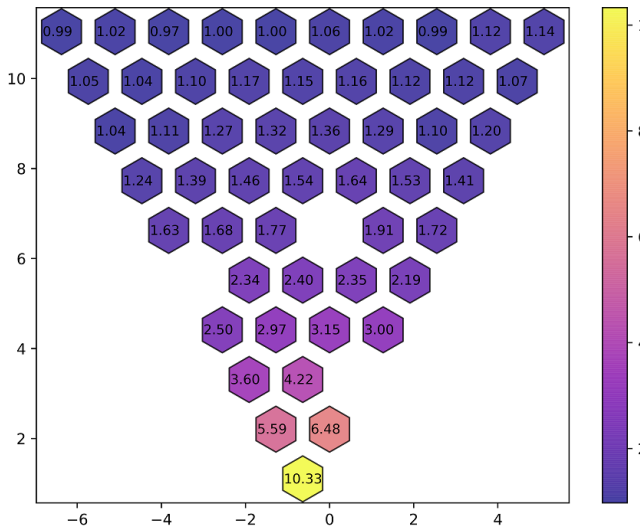


Рис. 11. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. SERPENT (5 г/кг, 320 °С).

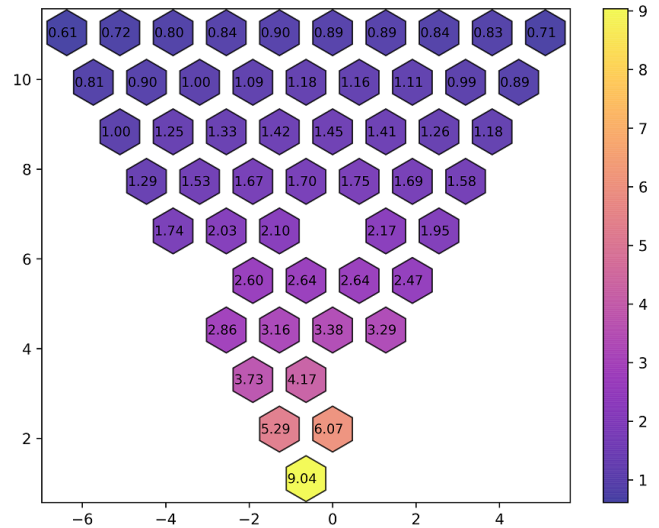


Рис. 12. Потвельний внесок у сигнал ДПЗ від центральної ТВЗ. MCNP (5 г/кг, 320 °С).

Висновки

Проведений комплекс розрахунків для аналізу особливостей формування сигналу в ДПЗ ВВЕР-1000 показує, що розрахункові схеми, розроблені за допомогою кодів MCNP та SERPENT, є коректними, чутливими до змін параметрів активної зони (температура та концентрації борної кислоти). Отримані дані свідчать про те, що в основному сигнал (на ~70 %) формується ТВЗ, в яку його встановлено, і на числове значення цього внеску суттєво впливає концентрація борного поглинача в теплоносії.

Аналіз потвельного внеску в сигнал дозволяє зробити висновок, що при відновленні ЛЕВ твेलів ТВЗ необхідно враховувати внесок з усіх твелів ТВЗ, а не лише один ряд твелів, що найближче до КНВ. Використання даних результатів при визначенні перехідної функції від струму ДПЗ до ЛЕВ дає змогу підвищити точність визначення даних функцій, а також відповідно надійність і безпечність експлуатації ядерного палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цимбалов С. А. Характеристики родиевого детектора нейтронов ДПЗ-1М / С. А. Цимбалов // Препринт ИАЭ-3899/4. - М., 1984.
2. MCNPTM – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Manual / Ed. by J. F. Briesmeister. – LA-13709-M, 2000. – 898 p. – (Documentation for CCC-700/MCNP4C Data Package, Section 4).
3. Leppänen J. Current Status of the PSG Monte Carlo Neutron Transport Code / J. Leppänen // Proceedings PHYSOR-2006 American Nuclear Society's Topical Meeting on Reactor Physics Organized and hosted by the Canadian Nuclear Society. Vancouver, BC, Canada, Sept. 10–14, 2006.
4. Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, User Manual / Ed. by Jaakko Leppänen, March 6, 2013 – 164 p.
5. НТС ГП НАЭК «Энергоатом». Разработка национального расчетного комплекса СВРК-М2. Протокол № 3 от 16.11.2016.

В. И. Борисенко^{1,2}, Ю. Ф. Пiontkovskiy²

¹ *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лисогорская, 12, Киев, 03028, Украина*

² *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, просп. акад. Глушкова, 4, Киев, 03022, Украина*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В МОНТЕ-КАРЛО КОДАХ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА ДЕТЕКТОРА ПРЯМОГО ЗАРЯДА
В ВВЭР-1000**

Статья посвящена сравнению результатов численного моделирования в Монте-Карло кодах SERPENT и MCNP элемента активной зоны ВВЭР-1000. Модель представляет собой семь тепловыделяющих сборок (ТВС) - центральная ТВС, вокруг которой находятся шесть соседних ТВС и детектор прямого заряда (ДПЗ), размещенный в центральном канале центральной ТВС. Проводились определения и сравнения вклада каждого твэла из всех семи ТВС в сигнал ДПЗ, а также локальная чувствительность детектора и влияние изменения параметров активной зоны ВВЭР-1000 (концентрация борной кислоты и температура теплоносителя 1-го контура, выгорание топлива и др.) на сигнал ДПЗ. Результаты, полученные в кодах MCNP и SERPENT, показывают, что сигнал ДПЗ на ~ 70 % формируется нейтронами, генерируемые твэлами ТВС, в которую установлен детектор, в частности: при увеличении концентрации борного поглотителя в теплоносителе 1-го контура вклад соседних ТВС уменьшается, а при повышении температуры теплоносителя вклад в сигнал ДПЗ от соседних ТВС увеличивается.

Ключевые слова: детектор прямого заряда, активация родиевого эмиттера, выгорание родиевого эмиттера, восстановление энергораспределения, канал нейтронных измерений.

V. I. Borysenko^{1,2}, Yu. F. Piontkovskiy²

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Lysogirsk str., 12, Kyiv, 03028, Ukraine

²*Nuclear Physics Department, Taras Shevchenko National University, Prospect Glushkova, 4, Kyiv, 03022, Ukraine*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION
IN MONTE-CARLO CODES FORMATION OF SIGNAL OF SELF-POWERED NEUTRON DETECTOR
IN VVER-1000**

The fuel rods linear power rate is one of the most important indicators of safety and operating reliability of fuel assemblies (FA) of VVER, which is defined in the in-core monitoring system (ICMS). Modern methods of modeling neutron-physical processes in the reactor core make it possible to more accurately determine the effect of core parameters on the formation of in-core monitoring signals. The article presents to the comparison of the results of Monte-Carlo numerical simulation with the SERPENT and MCNP codes of an element of the VVER-1000 core. The model consists of seven FA - a central fuel assembly, around which there are six neighboring FA and a self-powered neutron detector (SPND), located in the central channel of the central FA. Determinations and comparisons were made of the contribution of each fuel element from all seven FA to the SPND signal, as well as the local sensitivity of the detector and the effect of changes in the parameters of the VVER-1000 core (boric acid concentration and 1st circuit coolant temperature, fuel burnup, etc.) SPND signal. The results obtained in the MCNP and SERPENT codes show that the SPND signal is ~ 70 % generated by neutrons generated by fuel elements of the FA in which the detector is installed, in particular: when the concentration of the boron absorber in the coolant of the 1st circuit is increased, the contribution of neigh-

boring fuel assemblies decreases, and when the temperature of the coolant increases, the contribution to the SPND signal from neighboring fuel assemblies increases. The simulation results allow calculation of the geometric and spectral factors, which determines the contribution of fuel elements to the SPND signal. Also from our results it follows that the spectral characteristics of a neutron field must be taken into account to precisely account for their influence on in-core detector signal formation.

Keywords: self-powered neutron detector, activation of a rhodium emitter, burnup of a rhodium emitter, restoration of energy distribution, channel of neutron measurements.

REFERENCES

1. *Tsimbalov S. A.* Features rhodium neutron detector DPZ-1M / S. A. Tsimbalov // Preprint IAE-3899/4 - 1984. – 16 p. (Rus)
2. *MCNPTM – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Manual* / Ed. by J. F. Briesmeister. – LA-13709-M, 2000. – 898 p. – (Documentation for CCC-700/MCNP4C Data Package, Section 4).
3. *Leppänen J.* Current Status of the PSG Monte Carlo Neutron Transport Code / J. Leppänen // Proceedings PHSOR-2006 American Nuclear Society's Topical Meeting on Reactor Physics Organized and hosted by the Canadian Nuclear Society. Vancouver, BC, Canada, Sept. 10–14, 2006.
4. *Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, User Manual* / Ed. by Jaakko Leppänen, March 6, 2013 – 164 p.
5. *NTS NNEGC "Energoatom".* Development of a national settlement complex ICMS-M2. Protocol № 3 on 11/16/2016. (Rus)

Надійшла 19.09.2018

Received 19.09.2018