

Валідація коду Serpent 2 для визначення коефіцієнта розмноження нейтронів ядерного палива ВВЕР-1000 у межах підготовки константного забезпечення СВРК АЕС

- **Трофименко Олександр Русланович**
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7704-0911>
- **Якимчук Артем Олександрович**
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1788-7280>
- **Черепанов Ілля Юрійович**
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6963-3741>
- **Романенко Ірина Михайлівна**
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0090-8871>
- **Гулік Володимир Іванович**, канд. техн. наук
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3790-8392>
- **Голюк Марина Іванівна**
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9233-9287>
- **Хотяїнцева Олена Миколаївна**, канд. фіз.-мат. наук
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-2840>
- **Куцин Павло Миколайович**
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8090-6499>
- **Носовський Анатолій Володимирович**, акад. НАНУ, д-р техн. наук, проф.
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2594-3780>

У статті описано валідацію розрахунків коефіцієнта розмноження Монте-Карло кодом Serpent 2. Валідацію проведено порівнянням з іншими нейтронно-фізичними кодами. Опис валідаційної моделі та дані для порівняння взяті з бенчмарку «A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark, NEA/NSC/DOC(2002)10», у якому містяться результати розрахунку нейтронно-фізичних характеристик

тепловидільної збірки реактора ВВЕР-1000 такими кодами як-от: MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MCNP4B, MULTICELL. Також виконано порівняння з кодом версією Serpent 1, яка є попередньою версією розглянутого коду Serpent 2. Отримані результати свідчать про коректність розрахунку ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів ядерного палива за допомогою коду Serpent 2 та можливість його застосування на одному рівні з кодами TVS-M та HELIOS, які використовуються для підготовки константного забезпечення систем внутрішньореакторного контролю атомних станцій.

Ключові слова: нейтронно-фізичний розрахунок, Serpent, метод Монте-Карло, коефіцієнт розмноження, розрахункові коди, валідація, бенчмарк, ВВЕР-1000.

© Трофименко О. Р., Якимчук А. О., Черепанов І. Ю., Романенко І. М., Гулік В. І., Голюк М. І., Хотяїнцева О. М., Куцин П. М., Носовський А. В., 2022

Вступ

Історичний контекст. 04 березня 2022 року Збройними силами Російської Федерації (далі – РФ) здійснено обстріл майданчика Запорізької АЕС, внаслідок чого виникла пожежа на території станції. Внаслідок бойових дій м. Енергодар та майданчик Запорізької АЕС були захоплені збройними силами РФ [1], [2]. Цей день назавжди запам'ятається світу як один з проявів ядерного тероризму та залишить свій слід у пам'яті людства як кричуще ігнорування принципів ядерної безпеки.

24 лютого 2022 року, Україна від'єднала свою енергетичну систему від систем Республіки Білорусь та РФ абизгодомприєднатися до європейської системи операторів передачі електроенергії – ENTSO-E [3]. Це стало можливим завдяки підготовці всього енергетичного комплексу України, велику частку генерації якого забезпечує саме мирний атом [4]. Як зауважив міністр енергетики України Герман Галущенко: «Держава буде підтримувати атомну генерацію. І ми абсолютно впевнені, що величезна кількість проектів буде розвиватись в державі саме на базі атомної генерації, в тому числі, і за участю міжнародних партнерів, в першу чергу Сполучених Штатів Америки» [5]. Ця заява міністра підтверджуються тривалою та плідною співпрацею із західними партнерами [6]. Останніми прикладами впевнено можна назвати закупівлю ядерного палива на Рівненську АЕС [7] та підписання контракту на зведення в Україні блоків AP1000 на Хмельницькій АЕС [8].

Отже, мирний атом в Україні все впевненіше спрямовує свій погляд на захід. Ба більше, напад військ РФ на Україну 24 лютого 2022 року [9], [10], рекордні ціни на російський газ у Європі [11], безпрецедентні санкції всього цивілізованого світу проти агресії РФ [12] та врешті-решт переважаюча громадська позиція українців [13] майже не дають шансів очікувати на співпрацю України з Росією в майбутньому, зокрема з питань атомної енергетики.

Атомна енергетика в Україні бере початок ще за часів СРСР, а саме з 1977 року у момент введення в експлуатацію першого блока Чорнобильської АЕС. Уже станом на 1986 рік в Україні працювало 10 енергоблоків. Розвиток та напрацювання досвіду експлуатації продовжувався навіть незважаючи на найстрашнішу в історії людства ядерну техногенну катастрофу [14] і, як наслідок, накладений Верховною Радою УРСР у 1990 році мораторій на заборону будівництва атомних блоків, не кажучи вже про зрозумілий громадський супротив. А втім Україна досі успішно та безпечно експлуатує ядерні енергоблоки радянського дизайну на чотирьох майданчиках АЕС [15].

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Розробка радянськими вченими та інженерами проекту ВВЕР-1000 [6] призвела до того, що до сьогодні в Україні на енергоблоках АЕС з цими реакторами, у складі системи внутрішньореакторного контролю (далі – СВРК), експлуатується програмне забезпечення підсистеми фізичних розрахунків (далі – ПФР) російського виробництва – «Хортица», «Вояж» або «Круиз» [16], [17] із сімейства програм БІПР [18]. Для цих програм з метою врахування зворотних зв'язків у реакторі [19] створюється величезна багатовимірна матриця перерізів взаємодії нейтронів залежно від різних параметрів стану активної зони [20]. Таку матрицю прийнято називати груповим константним забезпеченням ПФР. Групове константне забезпечення готується окремо для кожного типу палива, з яким планується робота ПФР СВРК за допомогою спектральних високоточних детерміністичних кодів [21] або кодів на базі методу Монте-Карло. А оскільки програми «Вояж» та «Круиз» російського виробництва, то й константне забезпечення для них першочергово має готуватися російськими кодами TVS-M або SVL і SVC [16]. Отже, виникає проблемне питання відсутності в Україні зазначених розрахункових кодів та кваліфікованих користувачів. Виникла ситуація, в якій

Українські АЕС потребували б співпраці з російськими підприємствами. Ситуація ускладнена ще й використанням на АЕС України ядерного палива ТВЗ-W та ТВЗ-WR виробництва Westinghouse [6]. Підготовка константного забезпечення для ТВЗ-W(R) потребувала б надання російським фахівцям вичерпної технологічної інформації, яка належить до категорії комерційної. Врешті-решт константне забезпечення для ядерного палива будь-якого виробництва повинно бути підготовлене з використанням одного розрахункового коду, адже використання у ПФР СВРК бібліотеки нейтронно-фізичних констант, підготовленої різними кодами, фізично і математично некоректно [16].

На базі ПрАТ «СНВО «Імпульс» було розпочато дослідження самостійної підготовки бібліотеки констант для російського програмного забезпечення ПФР на українських АЕС [22] без залучення російських фахівців. Значним кроком у цьому напрямі став проєкт підготовки константного забезпечення в межах доопрацювання алгоритмів СВРК для здійснення контролю змішаного паливного завантаження, який виконувався в ПрАТ «СНВО «Імпульс» [23]. У межах цієї роботи було отримано задовільні результати [24], що підтвердило факт опанування українськими фахівцями методології підготовки константного забезпечення. Утім, у процесі пошуку альтернативних детерміністичних спектральних кодів на кшталт WIMS, HELIOS, NESSEL [22], [25], також було розглянуто й декілька перспективних варіантів нейтронно-фізичних кодів на базі методу Монте-Карло [26]. Для прикладу, одним з відомих в Україні нейтронно-фізичних кодів, завдання переносу частинок у якому розв'язується стохастичним методом Монте-Карло, є розроблений у Лос-Аламоській національній лабораторії (LANL, США) код MCNP [27], [28]. Такі коди як MCNP також здатні стати альтернативою кодам TVS-M або SVL і SVC. Однак підтвердження їх застосовності постало окремим дослідницьким питанням [29].

У цій статті наведено результати валідації нової версії коду Serpent 2 на базі методу Монте-Карло, який почав розроблятися у VTT Technical Research Centre (Фінляндія) з 2004 року як інструмент підготовки групових дифузійних констант для реакторних систем зі складною геометрією та різноманітним матеріальним складом [30], [31]. Валідація виконується порівнянням нейтронно-фізичних характеристик, розрахованих Serpent 2, з іншими розрахунковими кодами для абстрактної шестигранної тепловидільної збірки (далі – ТВЗ) ВВЕР-1000 згідно з бенчмарком «A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark» [32]. Подібна робота вже була виконана, але з використанням Монте-Карло коду Serpent 1 [33].

Мета та завдання дослідження. Підтвердити можливість використання коду Serpent 2 на базі

методу Монте-Карло як інструмента підготовки константного забезпечення для дифузійного розрахунку реакторів типу ВВЕР порівнянням результатів розрахунку з іншими нейтронно-фізичними спектральними кодами та попередньою версією Serpent 1.

Матеріали дослідження, експериментальна частина

Serpent – це код на базі методу Монте-Карло, призначений для нейтронно-фізичних розрахунків активної зони ядерного реактора [31], причому він використовує безперервну за енергією бібліотеку оцінених ядерних даних [34]. Зауважимо, що в бібліотеці перерізи наведені для дискретних рівнів енергії, але така бібліотека може бути використана для безперервного за енергією представлення перерізів. Розробка коду Serpent почалася в Технічному дослідному центрі Фінляндії VTT у 2004 році з коду під назвою «Probabilistic Scattering Game» або PSG. Пізніше назва коду була змінена на Serpent. На цей момент код Serpent розповсюджується через NEA банк даних [35] з квітня 2009 року. З часу випуску першої версії коду Serpent (в травні 2009 року), кількість користувачів зросла до 900 в 220 університетах і дослідницьких організаціях у 43 країнах світу. Більше 80 % зареєстрованих користувачів також використовують другу версію коду – Serpent 2.

Нині розробка коду Serpent розділена на дві окремі гілки: Serpent 1 є офіційно випущеним релізом, а Serpent 2 є розширеним його аналогом. Зауважимо, що на сьогодні більшість користувачів використовують саме Serpent 2, оскільки він має набагато ширший функціонал. Одна з цілей розробки Serpent 2 полягала в тому, щоб розширити можливості модуля вигорання з 2D-розрахунків на рівні ТВЗ до тривимірних задач, що складаються з сотень тисяч зон вигорання, без будь-яких обмежень під час використання паралельних розрахунків. Нові функції Serpent 2 – це можливість розрахунку переносу фотонів, ефективний інтерфейс для взаємодії з термогідролічними кодами і повна модернізація управління пам'яттю, яка забезпечує ефективне гібридне розпаралелювання (OpenMP або MPI) і дозволяє, за необхідності, відключити функції оптимізації використання пам'яті, присутні в Serpent 1.

Розробники коду Serpent, а також користувачі коду в наукових лабораторіях у всьому світі, опублікували велику кількість технічних звітів та наукових статей з валідації коду Serpent щодо його використання для моделювання різних реакторних систем [36]-[40].

Власне в цій статі, за допомогою коду Serpent 2 версії 2.1.30, було проведено розрахунки для валідаційної моделі ТВЗ з 12 тепловидільними гадоліні-

євими елементами (ТВЕГ) в бенчмарку [32]. Розглянута конфігурація ТВЗ визначена як «UGD assembly configuration» (UGD). Схема та візуалізація цієї ТВЗ засобами Serpent 2 зображена на рисунках 1 та 3 відповідно.

Модель ТВЗ складається з 312-ти тепловидільних елементів, 300 з яких – тепловидільні елементи з діоксидом урану UO_2 (ТВЕЛ) зі збагаченням 3,7 %, а інші 12 – це тепловидільні елементи з вигорючим поглиначем ТВЕГ на основі суміші діоксиду урану UO_2 (м.ч. 96 %) зі збагаченням 3,6 % та діоксиду гадолінію Gd_2O_3 (м.ч. 4 %). Також у моделі наявні 18 направляючих каналів та центральна трубка. Детальний опис матеріально-ізотопного складу моделі наведений у [32] і не буде повторно наводитися в цій статті.

Геометричні характеристики чарунок розглянутої ТВЗ (центральна трубка, направляючі канали, ТВЕЛ, ТВЕГ) наведені на рисунку 2. У моделі для ТВЕЛ та ТВЕГ $R_1 = 0,386$ см, $R_2 = 0,4582$ см; для направляючих каналів $R_1 = 0,545$ см, $R_2 = 0,632$ см; для центральної трубки $R_1 = 0,480$ см, $R_2 = 0,563$ см.

Зауважимо, що ТВЕГ додатково розбивалися на п'ять рівних за об'ємом зон вигорання за допомогою карти Serpent 2 «div ser» [41], для напрацювання більш точного ізотопного складу та отримання коректних результатів [32].

Розрахунок процесу переносу нейтронів у нескінченній паливній решітці ТВЗ виконувався для декількох станів, що відрізняються температурою палива, теплоносія, концентрацією борної кислоти та наявністю отруювачів (ізоотопів ^{135}Xe та ^{149}Sm). Параметри для п'яти станів наведені в таблиці 1. Зазначимо, що стани в таблиці 1 є не випадковими та відповідають базовому (стан S1) і характерним похідним станам (S2-S5) для реакторів ВВЕР-1000.

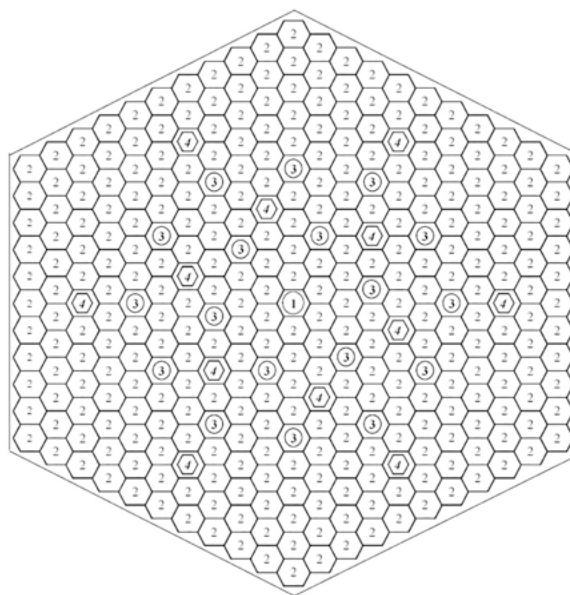


Рисунок 1 – Схема UGD ТВЗ [32]:

1 – Центральна трубка; 2 – ТВЕЛ зі збагаченням 3,7 % за ^{235}U ; 3 – направляючі канали; 4 – ТВЕГ (96,0 % за масою діоксиду урану зі збагаченням 3,6 % за ^{235}U + 4,0 % Gd_2O_3)

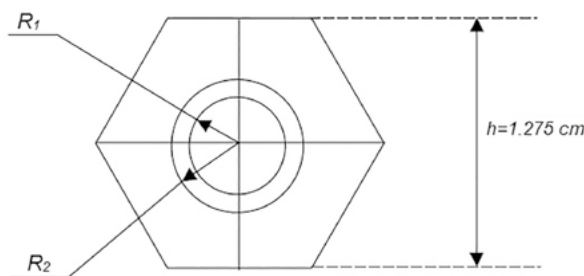


Рисунок 2 – Загальна схема елементів паливної решітки ТВЗ UGD

Таблиця 1 – Розрахункові стани для порівняння

Стан	Опис	Температура палива [K]	Температура середовища [K]	^{135}Xe , ^{149}Sm
S1	Діючий отруєний стан (вигорання)	1027	575	Eq*
S2	Діючий неотруєний стан	1027	575	0,0
S3	Гарячий стан	575	575	0,0
S4	Гарячий стан без борної кислоти	575	575	0,0
S5	Холодний стан	300	300	0,0

*Eq вказує на рівноважні концентрації ^{135}Xe та ^{149}Sm .

Під час проведення розрахунків Serpent 2 використовувалась цифрова бібліотека ENDF/B-7.0 (далі – ENDF/B) [42], [43] та відповідні бібліотеки розсіювання нейтронів у легкій воді: lwe7.00t, lwe7.02t, lwe7.10t та lwe7.12t. Зауважимо, що для коду MCU було використано бібліотеку MCUDAT-2.1 (48 енергетичних груп), для коду WIMS8A було використано бібліотеку JEF-2.2 (172 енергетичні групи), для кодів HELIOS та MULTICELL було використано ENDF/B-6.0 [32].

Розв'язування задачі критичності в Serpent 2 було виконано із застосуванням картки «set pop 60000 1000 100», яка моделює 60000 циклів нейтронів по 1000 нейтронів у кожному, причому 100 перших найбільш нестійких циклів не враховуються в кінцевому результаті [41]. Отже, для кожного одиничного розрахунку Serpent 2 моделювалося та записувалося 60 мільйонів нейтронних історій (імовірних варіантів взаємодії нейтронів з речовиною).

Зазначимо, що кожний елемент паливної решітки у Serpent 2 (картка «lat» [41]) був окремо заданий з унікальною назвою за допомогою картки «pin» [41].

Розрахунок вигорання ядерного палива проводився у стані S1 з кроком 1 МВт-діб/кгU в діапазоні від 0 до 15 та з кроком 5 МВт-діб/кгU в діапазоні від 15 до 40 за допомогою картки Serpent 2 «dep butot» [41]. Потужність, на якій проводився розрахунок зміни ізотопного складу, дорівнювала 108 МВт/м³ або ж 52,164 кВт/см при застосуванні картки «set power» [41]. Концентрації нуклідів, які були отримані в процесі моделювання вигорання ядерного палива, автоматично використовувалися для розрахунку нейтронно-фізичних параметрів у інших станах. Зауважимо, що концентрації ¹³⁵Xe та ¹⁴⁹Sm для деяких станів приймаються рівними нулю, незважаючи на отримані під час розрахунку вигорання. Занулення концентрацій ¹³⁵Xe та ¹⁴⁹Sm можливо у разі використання спеціальних карток «xenon 0» та «samarium 0» у процесі задання розрахункових станів картою «branch» [41].

Нововведенням для цієї моделі ТВЗ також є використання картки «set mcvol» [41], за якою виконується попередній розрахунок об'ємів всіх задіяних матеріалів методом Монте-Карло. Згідно з рекомендаціями розробників коду, використання цієї картки є доцільним у випадках складної геометрії, у якій задіяно багато чарунок. У випадку простої геометрії розрахунковий код самостійно визначає об'єми матеріалів. Об'єми фіксуються у вихідному файлі з розширенням «.out». Однак спираючись на особистий досвід авторів статті, зауважимо, що попередній перерахунок об'ємів користувачем Serpent є дуже важливим та повинен виконуватись на етапі моделювання у будь-якому разі, незважаючи на складність розрахункової схеми.

Першочерговим параметром для порівняння з іншими розрахунковими кодами було обрано ко-

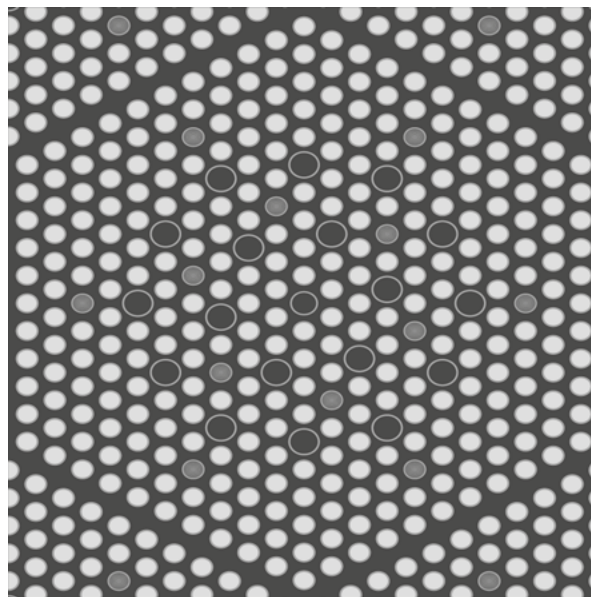


Рисунок 3 – Serpent візуалізація UGD ТВЗ

ефіцієнт розмноження нейтронів, розрахований як відношення кількості утворених нейтронів до кількості поглинутих [19]. Зазначимо, що усі обчислення проводилися за періодичних граничних умов нескінченної паливної решітки заданих картою «set bc 3» [41]. У такому випадку коефіцієнт розмноження визначається за відсутності витоку нейтронів за межі ядерної системи [19]. Коефіцієнт розмноження нейтронів ядерної системи є інтегральним параметром і тому найбільш допустимий для першочергової оцінки правильності розрахункової схеми, перерізів взаємодії нейтронів та математичної моделі [33].

Serpent-візуалізація розробленої моделі ТВЗ UGD наведена на рисунку 3 та виконана з використанням картки «plot» [41].

Інтерпретація результатів та їх апробація

Розраховані засобами Serpent 2 коефіцієнти розмноження нейтронів для стану S1, залежно від глибини вигорання ядерного палива (BU), наведено в таблиці 2. Відносні відхилення коефіцієнта розмноження Serpent 2 від інших кодів (за модулем) наведено у таблиці 3.

Розраховані засобами Serpent 2 коефіцієнти розмноження нейтронів для похідних станів, залежно від глибини вигорання ядерного палива, наведено в таблиці 4. Водночас за наведеними в таблиці 4 коефіцієнтами розмноження було розраховано найбільш характерні ефекти реактивності, які наведено у таблиці 5.

У таблиці 6 наведені відхилення коефіцієнта розмноження, розрахованого Serpent 2, відносно інших кодів для зазначених у таблиці 1 станів та залежно від глибини вигорання ядерного палива.

Таблиця 2 – Порівняння коефіцієнта розмноження для стану S1

BU, МВт-діб/кгU	Значення коефіцієнта розмноження нейтронів, в.о.							
	MCU	TVS-M	WIMS8A	HELIOS	MULTICELL	Середнє*	Serpent 1 [33]	Serpent 2
0	1,1353	1,1353	1,1328	1,1355	1,1363	1,1350	1,1341	1,1350
1	1,1364	1,1345	1,1303	1,1361	1,1370	1,1349	1,1326	1,1356
2	1,1354	1,1355	1,1318	1,1377	1,1382	1,1357	1,1340	1,1377
3	1,1388	1,1359	1,1330	1,1387	1,1386	1,1370	1,1345	1,1391
4	1,1377	1,1365	1,1341	1,1395	1,1389	1,1373	1,1349	1,1405
5	1,1390	1,1375	1,1358	1,1407	1,1394	1,1385	1,1355	1,1422
6	1,1408	1,1390	1,1380	1,1421	1,1404	1,1401	1,1366	1,1440
7	1,1427	1,1403	1,1392	1,1430	1,1414	1,1413	1,1379	1,1449
8	1,1421	1,1390	1,1371	1,1414	1,1404	1,1400	1,1369	1,1430
9	1,1344	1,1346	1,1318	1,1365	1,1363	1,1347	1,1329	1,1380
10	1,1284	1,1273	1,1240	1,1291	1,1295	1,1277	1,1259	1,1303
11	1,1178	1,1185	1,1150	1,1203	1,1209	1,1185	1,1177	1,1215
12	1,1099	1,1092	1,1058	1,1112	1,1117	1,1096	1,1084	1,1124
13	1,0996	1,1000	1,0966	1,1020	1,1025	1,1001	1,0997	1,1032
14	1,0923	1,0910	1,0877	1,0931	1,0935	1,0915	1,0912	1,0942
15	1,0827	1,0821	1,0790	1,0843	1,0846	1,0825	1,0826	1,0855
20	1,0403	1,0405	1,0383	1,0435	1,0427	1,0411	1,0416	1,0446
25	1,0039	1,0022	1,0017	1,0061	1,0041	1,0036	1,0049	1,0072
30	0,9703	0,9665	0,9681	0,9714	0,9681	0,9689	0,9715	0,9690
35	0,9415	0,9332	0,9372	0,9391	0,9343	0,9371	0,9401	0,9399
40	0,9091	0,9025	0,9088	0,9091	0,9029	0,9065	0,9110	0,9099

* – Наведено усереднене значення коефіцієнта розмноження для кодів MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL.

Таблиця 3 – Відхилення Serpent 2 відносно інших кодів за модулем

BU, (МВт·діб/кгU)	Відхилення Serpent 2 відносно інших кодів за модулем, %						
	MCU	TVS-M	WIMS8A	HELIOS	MULTICELL	Середнє*	Serpent-1
0	0,03	0,03	0,19	0,04	0,11	0,00	0,08
1	0,07	0,10	0,47	0,04	0,12	0,07	0,26
2	0,20	0,19	0,52	0,00	0,04	0,17	0,33
3	0,03	0,28	0,54	0,04	0,04	0,18	0,41
4	0,25	0,35	0,56	0,09	0,14	0,28	0,49
5	0,28	0,41	0,56	0,13	0,25	0,33	0,59
6	0,28	0,44	0,53	0,17	0,32	0,35	0,65
7	0,19	0,40	0,50	0,17	0,31	0,31	0,62
8	0,08	0,35	0,52	0,14	0,23	0,26	0,54
9	0,32	0,30	0,55	0,13	0,15	0,29	0,45
10	0,17	0,27	0,56	0,11	0,07	0,23	0,39
11	0,33	0,27	0,58	0,11	0,05	0,27	0,34
12	0,23	0,29	0,60	0,11	0,06	0,26	0,36
13	0,33	0,29	0,60	0,11	0,06	0,28	0,32
14	0,17	0,29	0,60	0,10	0,06	0,25	0,27
15	0,26	0,31	0,60	0,11	0,08	0,27	0,27
20	0,41	0,39	0,61	0,11	0,18	0,34	0,29
25	0,33	0,50	0,55	0,11	0,31	0,36	0,23
30	0,13	0,26	0,09	0,25	0,09	0,01	0,26
35	0,17	0,72	0,29	0,09	0,60	0,30	0,02
40	0,09	0,82	0,12	0,09	0,78	0,38	0,12
Максимальне:	0,41	0,82	0,61	0,25	0,78	0,38	0,65
Подвійне СКО:	0,22	0,35	0,32	0,10	0,38	0,21	0,34

* – Наведено усереднене значення коефіцієнта розмноження для кодів MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL.

Таблиця 4 – Коефіцієнти розмноження для заданих станів

BU МВт-діб/кгU	Розрахункові стани				
	S1	S2	S3	S4	S5
MCU					
0	1,1353	1,1779	1,1899	1,2499	1,3197
20	1,0403	1,0809	1,095	1,1496	1,2192
40	0,9091	0,9432	0,9562	1,0063	1,0632
TVS-M					
0	1,1353	1,1768	1,19	1,2504	1,3213
20	1,0405	1,0781	1,0928	1,1484	1,2138
40	0,9025	0,9325	0,946	0,9954	1,047
WIMS8A					
0	1,1328	1,1695	1,1845	1,2433	1,3122
20	1,0383	1,0781	1,0941	1,1477	1,2173
40	0,9088	0,9422	0,9566	1,0041	1,0604
HELIOS					
0	1,1355	1,175	1,1894	1,249	1,3181
20	1,0436	1,0828	1,0988	1,1535	1,2198
40	0,9092	0,9422	0,9572	1,0063	1,0577
MULTICELL					
0	1,1363	1,1776	1,1919	1,2518	1,3164
20	1,0427	1,0835	1,0989	1,1543	1,2192
40	0,9029	0,9368	0,9509	1,0005	1,0505
Serpent 1 [33]					
0	1,1368	1,172	1,1805	1,2385	1,3137
20	1,0416	1,0825	1,0918	1,1444	1,2175
40	0,911	0,9449	0,9543	1,0003	1,0594
Serpent 2					
0	1,1348	1,1759	1,1896	1,2496	1,3224
20	1,0447	1,0824	1,0974	1,1527	1,2220
40	0,9099	0,9405	0,9540	1,0034	1,0587

Таблиця 5 – Порівняння розрахованих ефектів реактивності

Ефекти реактивності	BU МВт·діб/кгU	MCU	TVS-M	WIMS8A	HELIOS	MULTICELL	Serpent 1 [33]	Serpent 2
S1-S2 (Xe та Sm)	0	-4,26	-4,15	-3,67	-3,95	-4,13	-3,53	-4,10
	20	-4,06	-3,76	-3,98	-3,92	-4,08	-4,08	-3,77
	40	-3,41	-3,00	-3,33	-3,30	-3,39	-3,39	-3,06
S3-S4 (борний)	0	-6,00	-6,04	-5,88	-5,96	-5,99	-5,79	-6,01
	20	-5,46	-5,56	-5,36	-5,48	-5,54	-5,26	-5,53
	40	-5,01	-4,94	-4,75	-4,91	-4,96	-4,59	-4,94
S3-S2 (темп. палива)	0	1,20	1,32	1,50	1,44	1,43	0,85	1,37
	20	1,41	1,47	1,60	1,60	1,54	0,94	1,50
	40	1,30	1,35	1,44	1,50	1,41	0,95	1,35
S4-S5 (темп.)	0	-6,98	-7,09	-6,89	-6,91	-6,46	-7,52	-7,28
	20	-6,96	-6,54	-6,95	-6,63	-6,49	-7,31	-6,93
	40	-5,69	-5,16	-5,63	-5,15	-5,00	-5,92	-5,53

Таблиця 6 – Відхилення Serpent 2 відносно інших кодів за модулем

BU, (МВт·діб/кгU)	Відхилення Serpent 2 відносно інших кодів % для станів:				
	S1	S2	S3	S4	S5
Відхилення від MCU (подвійне СКО = 0,25 %)					
0	0,04	0,17	0,03	0,02	0,21
20	0,42	0,14	0,22	0,27	0,23
40	0,09	0,29	0,23	0,29	0,43
Відхилення від TVS-M (подвійне СКО = 0,72 %)					
0	0,04	0,08	0,04	0,06	0,09
20	0,41	0,40	0,42	0,37	0,67
40	0,82	0,85	0,84	0,80	1,11
Відхилення від WIMS8A (подвійне СКО = 0,40 %)					
0	0,18	0,54	0,43	0,51	0,78
20	0,62	0,40	0,30	0,43	0,38
40	0,12	0,18	0,27	0,07	0,16

Відхилення від HELIOS (подвійне СКО = 0,21 %)					
0	0,06	0,07	0,01	0,05	0,33
20	0,11	0,04	0,13	0,07	0,18
40	0,08	0,18	0,34	0,29	0,09
Відхилення від MULTICELL (подвійне СКО = 0,44 %)					
0	0,13	0,15	0,20	0,17	0,46
20	0,19	0,10	0,14	0,14	0,23
40	0,77	0,39	0,32	0,29	0,78
Відхилення від Serpent 1 (подвійне СКО = 0,56 %)					
0	0,17	0,33	0,77	0,90	0,66
20	0,30	0,01	0,51	0,72	0,37
40	0,12	0,47	0,03	0,31	0,07
Максимальні відхилення Serpent 2:					
0	0,18	0,54	0,77	0,90	0,78
20	0,62	0,40	0,51	0,72	0,67
40	0,82	0,85	0,84	0,80	1,11

Висновки

Отже, за допомогою нового коду Serpent 2 версії 2.1.30 на базі методу Монте-Карло було розроблено двовимірну нейтронно-фізичну модель ТВЗ з вигоряючим гадолінієм для реактора ВВЕР-1000. Детальний опис моделі, а саме матеріальний склад та геометричні характеристики, було взято з бенчмарку «A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark» [32]. Власне з бенчмарку також були взяті дані для валідації коду Serpent 2 порівнянням результатів з іншими нейтронно-фізичними кодами. Для виконання розрахунків було використано бібліотеку оцінених ядерних даних ENDF/B-7.0. Як порівняльну характеристику було обрано коефіцієнт розмноження нейтронів, який, зі свого боку, є інтегральним параметром реакторної системи.

Загалом було проведено розрахунки вигорання (режим «-his» [41]) та розрахунок станів (режим «-coe» [41]).

У всіх випадках відхилення коефіцієнта розмноження нейтронів менше 0,38 % відносно усеред-

неного значення між кодами MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL. Такі відхилення вказують на схожу поведінку всіх розрахункових моделей та застосованих до них бібліотек оцінених ядерних даних.

Найбільші відносні відхилення Serpent 2 спостерігаються зі збільшенням глибини вигорання палива, особливо порівняно з кодом TVS-M. Найменші відхилення та найкраща узгодженість результатів спостерігається порівняно з кодом HELIOS. Зауважимо на значні відносні відхилення, порівняно з версією Serpent 1, які досягають 0,56 %.

Подвійні середньоквадратичні відхилення не перевищують 1 % як для базового, так і для похідних станів, що можна вважати хорошим результатом.

Отже, було проведено серію розрахунків із застосуванням відносно нового коду Serpent 2 версії 2.1.30 на базі методу Монте-Карло. Загалом можна стверджувати, що розрахункова схема та обрана бібліотека оцінених ядерних даних, за умови ідентичних для всіх розглянутих кодів вхідних даних, є коректними та дають результати доволі близькі до кодів TVS-M та особливо HELIOS. Отже, перспектива використання коду Serpent 2 на базі методу Монте-Карло, як інструмента підготовки

константного забезпечення для дифузійного розрахунку реакторів типу ВВЕР, є можливою з огляду на те, що коди TVS-M, WIMS та HELIOS уже використовуються для поставлених завдань. Особливу увагу варто приділити саме порівнянню результатів з кодом TVS-M, який використовуються для підготовки бібліотеки констант програмного забезпечення «Вояж» та «Круз» російського виробництва.

Наведені в цій статті наукові результати основані на технічному звіті «Кваліфікація розрахункового Монте-Карло коду Serpent для підготовки константного забезпечення для дифузійного розрахунку реакторів ВВЕР», 0229767.01247-01, ПрАТ «СНВО «Імпульс», 2020 [45]. На основі цього звіту, код Serpent 2 версії 2.1.30 на базі методу Монте-Карло був доданий у перелік рекомендованих ДП «НАЕК «Енергоатом» кодів для розрахунку реакторів ВВЕР.

З метою валідації більшого переліку нейтронно-фізичних характеристик та напрацювання досвіду використання кодів на базі методу Монте-Карло для розрахунку реакторів типу ВВЕР вважаємо за доцільне виконання подальшого дослідження можливостей розрахункового коду Serpent 2 з питань підготовки константного забезпечення для СВРК українських АЕС.

Список використаної літератури

1. Запорізька АЕС всю ніч горіла через обстріли. *BBC Україна*. Дата оновлення: 4.03.2022. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-60615300> (дата звернення: 13.03.2022).
2. Мельник Т. Запорізьку атомну станцію контролюють окупанти. Радіаційний фон у нормі (оновлюється). *Forbes Ukraine*. Дата оновлення: 04.03.2022. URL: <https://forbes.ua/news/na-zaporizkiy-atomny-stantsii-pochalasya-pozhezhamiskiy-golova-energodaru-04032022-4134> (дата звернення: 13.03.2022).
3. Зануда А. Від'єднання під обстрілами: енергосистема України від'єдналася від Росії та Білорусі. *BBC Україна*. Дата оновлення 24.02.2022. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-60507216> (дата звернення: 19.03.2022).
4. Маркевич К., Омельченко В. Ядерна енергетика у світі та Україні: поточний стан та перспективи розвитку (аналітичний огляд). Центр Разумкова. Київ. 2015.
5. Міністерство енергетики України. Герман Галущенко: Атомна генерація – найбільш надійна генерація в країні. Дата оновлення: 18.10.2021. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/german-galushchenko-atomna-generaciya-najbilsh-nadijna-generaciya-v-krayini> (дата звернення: 13.03.2022).
6. Омельченко В. Диверсифікація постачання ядерного палива в Україні: хронологія та відкриті запитання. Дата оновлення: 02.12.2020. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/dyversyfikatsiia-postachania-iadernogo-palyva-v-ukrainu-khronologiia-ta-vidkryti-zapytannia> (дата звернення: 13.03.2022).
7. На Рівненську АЕС прибуло ядерне паливо Westinghouse. *Економічна правда*. Дата оновлення: 21.07.2021. URL: <http://www.epravda.com.ua/news/2021/07/21/676148/> (дата звернення: 13.03.2022).
8. Westinghouse – найбільш комплексний постачальник послуг повного ядерного циклу. Westinghouse Electric Company LLC. Дата оновлення: 23.02.2022. URL: <https://info.westinghousenuclear.com/ukraine/news-insights/> (дата звернення: 13.03.2022).
9. Росія напала на Україну. В різних містах лунають вибухи. *BBC Україна*. Дата оновлення: 24.02.2022. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-60432981> (дата звернення: 13.03.2022).
10. Звернення Президії НАН України до науковців Академії. *Національна Академія Наук України*. Дата оновлення: 17.03.2022. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=8807&fbclid=IwAR2zt-JJ9uHs-MUKzMT-bc8ED2Bqeo73HNW6wP8EpofozW2RCJa8zT9ds4c> (дата звернення: 17.03.2022).
11. Ціни на газ побили рекорд у \$2000 - через мороз, вітер і Газпром. *BBC Україна*. Дата оновлення: 21.12.2021. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-59740052> (дата звернення: 13.03.2022).
12. Зануда А. Санкції проти Росії: що про них треба знати. *BBC Україна*. Дата оновлення: 28.01.2022. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-60154742> (дата звернення: 13.03.2022).
13. Visontay E. Ukraine soldiers told Russian officer 'go fuck yourself' before they died on island. *The Guardian*. Дата оновлення: 25.02.2022. URL: <https://www.theguardian.com/world/2022/feb/25/ukraine-soldiers-told-russians-to-go-fuck-yourself-before-black-sea-island-death> (дата звернення: 13.03.2022).
14. Носовский А. В., Васильченко В. Н., Ключников А. А., Пристер Б. С. Авария на Чернобыльской АЭС. Опыт преодоления. Извлеченные уроки. А. В. Носовский, Ред., Чернобыль: К.: Техніка, 2006, 264 с.
15. Діючі АЕС. *Uatom*. Дата оновлення: 2019 URL: <https://www.uatom.org/zagalni-vidomosti> (дата звернення: 13.03.2022).
16. Халимончук В. А. Функционирование программного обеспечения СВРК ВВЭР-1000 верхнего уровня в условиях реализации в Украине расширенной программы по диверсификации ядерного топлива. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 1(65). С. 7-12. doi: 10.32918/nrs.2015.1(65).02.
17. Горелик А. Х., Елисеев В. В, Кукуль А. С., Орловский В. А., Падун С. П., Якубов В. Ф. Концепция модернизации систем внутриреакторного контроля ВВЭР-1000 АЭС Украины. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2005. № 4. С. 53-65.
18. Петрунин Д. М., Беляева Е. Д., Киреева И. Л. Программа БИПР-5. Описание структуры и входных данных. Москва: Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова. 1975. 38 с.
19. Павлович В. М. Фізика ядерних реакторів. Чернобыль: ЗАТ «Книга». 2009. 224 с.
20. Watson J., Ivanov K., Macian R. Cross Section Generation Methodology for Three Dimensional Transient Reactor Simulation. *Transactions of the American Nuclear Society*. 1997.

21. Гальченко В. В., Мишин А. А. Порівняльний аналіз нейтронно-фізичних характеристик кампанії реактора з використанням різних наборів бібліотек ядерних даних для програмного продукту WIMSD5B. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 3(67). С. 8-12. doi: 10.32918/nrs.2015.3(67).02.

22. Гальченко В. В., Мишин А. А., Шлапак І. І. Константное обеспечение подсистемы физических расчетов СВРК-М «Вояж». *Ядерна фізика та енергетика*. 2018. Т. 19. № 2. С. 121-130.

23. Енергоблок № 2. Послуги з доопрацювання алгоритмів СВРК для забезпечення контролю змішаного паливного завантаження. ДП НАЕК «Енергоатом». Дата оновлення: 09. 11. 2016. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2016-10-25-000250-a> (дата звернення: 13. 03. 2022).

24. Внедрение ТВС производства «Вестингауз» на энергоблоках ЗАЭС. Разработка методики подготовки константного обеспечения СВРК. ПРАТ ЧНВО «Імпульс». Севєродонецьк. 2016.

25. Гальченко В. В. Сравнительный анализ подготовки данных с использованием различных компьютерных кодов. Часть 2. Ядерні та радіаційні технології. 2007. Т. 7, № 3-4. С. 29-41.

26. Lux I., Koblinger L. Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc. 2000. 530 p.

27. Briesmeister J. F. MCNP – A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code (Version 4C). Radiation Safety Information Computational Center (RSICC). Дата оновлення: 18.12.2000. URL: <https://inspirehep.net/files/78c669e8d3bb59cc6fb868a6061450c> (дата звернення: 13. 03. 2022).

28. A General Monte Carlo N-Particle (MCNP) Transport Code. LANL URL: <https://mcnp.lanl.gov/> (дата звернення: 19. 03. 2022).

29. Гальченко В. В., Гулік В. І., Шлапак І. І. Використання програмного продукту Serpent на основі методу Монте-Карло для розрахунку характеристик тепловиділяючої збірки реактора ВВЕР-1000. *Ядерна фізика та енергетика*. 2016. Т. 17. № 3. С. 250-258.

30. Leppänen J. Serpent a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre. 2004. URL: <http://montecarlo.vtt.fi/index.htm> (дата звернення: 13.03.2022).

31. Leppänen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 2014. No. 82. pp. 142-150.

32. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. NEA/NSC/DOC. 2002. URL: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/nsc-doc2002-10.pdf> (дата звернення: 13.03.2022).

33. Galchenko V., Shlapak I., Gulik V. Computational Benchmark for Fuel Assembly of VVER-1000 Using the Monte Carlo Serpent Code. *Nuclear Technology & Radiation Protection*. 2018. No. 1(33). pp. 24-30.

34. National Nuclear Data Center (NNDC). Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR). Viktor Zerkov (NDS, International Atomic Energy Agency). Дата оновлення: 07.03.2022. URL: <https://www-nds.iaea.org/exfor/> (дата звернення: 19.03.2022).

35. NEA Data Bank. Management Board for the Development, Application and Validation of Nuclear Data and Codes (MBDAV). Nuclear Energy Agency (NEA). URL: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_28124/about-the-data-bank (дата звернення: 13.03.2022).

36. Viitanen T., Leppänen J. Calculating Neutron Dosimeter Activation in VVER-440 Surveillance Chains with Serpent. *26th AER Symposium on VVER Reactor Physics and reactor safety (October 10-14)*. Helsinki, Finland. 2016.

37. Viitanen T., Leppänen J. Validating the Serpent Model of FiR 1 Triga Mk-II Reactor by Means of Reactor Dosimetry. *EPJ Web of Conferences*, 106. 2014.

38. Aufiero M., Brovchenko M., Cammi A., Clifford I., Geoffroy O., Heuer D., Laureau A., Losa M., Luzzi L., Merle-Lucotte E., Ricotti M., Rouch H. Calculating the effective delayed neutron fraction in the molten salt fast reactor: Analytical, deterministic and Monte Carlo approaches. *Annals of Nuclear Energy*. 2014. Vol. 65. pp. 78-90.

39. Leppänen J., DeHart M. HTGR reactor physics and burnup calculations using the Serpent Monte Carlo code. *American Nuclear Society Transactions*. 2009. Vol.101. pp. 782-784.

40. Gulik V., Tkaczyk A. H. Cost optimization of ADS design: Comparative study of externally driven heterogeneous and homogeneous two-zone subcritical reactor systems. *Nuclear engineering and design*. 2014. Vol. 270. pp. 132-142.

41. Leppänen J. Serpent Code Wiki: user Manual for Serpent 2. Дата оновлення: 05.10.2019. URL: http://serpent.vtt.fi/mediawiki/index.php/Main_Page (дата звернення: 19.03.2022).

42. Chadwick M., Obložinský P., Herman M. et al. ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. *Nuclear Data Sheets*. 2006. Vol. 102. pp. 2931-3060.

43. Obložinsky P. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007. *New ENDF/B-7.0 library*. Upton. 2008.

44. V. d. Marck S. C. Benchmarking ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0 and JEFF-3.1.1 with MCNP6. *Nuclear Data Sheets*. 2012. Vol. 113, Iss. 12, pp. 2935-3005.

45. Кваліфікація розрахункового Монте-Карло коду Serpent для підготовки константного забезпечення для дифузійного розрахунку реакторів ВВЕР. ПРАТ «ЧНВО «Імпульс». Севєродонецьк. 2020.

References

1. Zaporizhzhya NPP burned all night due to shelling. (2022, March 4). *BBC Ukrainian*. Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-60615300/>

2. Melnyk, T. (2022, March 4). Zaporizhzhya nuclear power plant is controlled by the occupiers. Normal radiation background (updated). *Forbes Ukraine*. Retrieved March 13, 2022, from: <https://forbes.ua/news/na-zaporizhkiy-atomnyi-stantsii-pochalasya-pozhezha-miskiy-golova-energodaru-04032022-4134>.

3. Zanuda, A. (2022, February 24). Disconnection under fire: Ukraine's energy system disconnected from Russia and Belarus. *BBC Ukrainian*. Retrieved March 19, 2022, from <https://www.bbc.com/ukrainian/news-60507216>.
4. Markevych, K., Omelchenko, V. (2015). Nuclear energy in the world and Ukraine: current state and prospects of development (analytical review). Razumkov Center. Kyiv.
5. Ministry of Energy of Ukraine. (2021, October 18). Herman Galushchenko: Atomic generation is the most reliable generation in the country. Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.kmu.gov.ua/news/german-galushchenko-atomna-generaciya-najbilsh-nadijna-generaciya-v-krayini>.
6. Omelchenko, V. (2020, December 2). Diversification of nuclear fuel supply to Ukraine: chronology and open questions. Retrieved March 13, 2022, from: <https://razumkov.org.ua/statti/dyversyfikatsiia-postachania-iadernogo-palyva-v-ukrainu-khronologii-ta-vidkryti-zapytannia>.
7. Westinghouse nuclear fuel arrived at Rivne. (2021, July 21). NPP. *Economic Truth*. Retrieved March 13, 2022, from: <http://www.althoughda.com.ua/news/2021/07/21/676148/>.
8. Westinghouse Electric Company LLC (2022, February 23). *Westinghouse is the most comprehensive provider of full nuclear cycle services*. Retrieved March 13, 2022, from: <https://info.westinghousenuclear.com/ukraine/news-insights/>.
9. Russia attacked Ukraine. Explosions are heard in different cities. (2022, February 24). *BBC Ukrainian*. Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-60432981>.
10. National Academy of Sciences of Ukraine. (2022, March 17). Address of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine to scientists of the Academy. Retrieved March 17, 2022, from: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=8807&fbclid=IwAR2zt-JJ9uHs-MUkzMT-bc8ED2Bqeo73HNW6wP8EpozW2RCJa8z209>.
11. Gas prices break the record of \$ 2,000 – due to frost, wind and Gazprom. (2021, December 21). *BBC Ukrainian*. Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-59740052>.
12. Boredom, A. (2022, January 28). Sanctions against Russia: what you need to know about them. *BBC Ukrainian*. Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-60154742>.
13. Visontay E. (2022, February 25). Ukraine soldiers told Russian officer 'go fuck yourself' before they died on island. *The Guardian*. Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.theguardian.com/world/2022/feb/25/ukraine-soldiers-told-russians-to-go-fuck-yourself-before-black-sea-island-death>.
14. Nosovsky, A. V., Vasilchenko, V. N., Klyuchnikov, A. A., Prister, B. S. (2006). Accident at the Chornobyl nuclear power plant. Experience of overcoming. Lessons learned, A. V. Nosovsky, Ed., Chornobyl: K.: Technology. 264 p.
15. Uatom. *Operating NPPs*: Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.uatom.org/zagalni-vidomosti>.
16. Khalimonchuk, V. A. (2015). Operation of the top-level VVER-1000 SVRK software in the conditions of implementation of the expanded program on diversification of nuclear fuel in Ukraine. *Nuclear and Radiation Safety*. 1(65), 7-12. doi: 10.32918/nrs.2015.1(65).02.
17. Gorelik, O. H., Eliseev, V. V., Kuzhil, O. S., Orlovsky, V. D., Padun, S. P., Yakubov, V. F. (2005). The concept of modernization of WWER-1000 internal reactor control systems of Ukrainian NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 4, 53-65.
18. Petrunin, D. M., Belyaeva, E. D., Kireeva, I. L. (1975). BIPR-5 program. Description of structure and input data. Educational ed., E.D. Markova, Ed., Moscow: Institute of Atomic Energy. I. V. Kurchatova, 38 p.
19. Pavlovich, V. M. (2009). Physics of nuclear reactors. Chornobyl: CJSC "Book", 224 p.
20. Watson, J., Ivanov, K., Macian, R. (1997). Cross Section Generation Methodology for Three Dimensional Transient Reactor Simulation. *Transactions of the American Nuclear Society*.
21. Galchenko, V. V., Mishin, A. A. (2015). Comparative analysis of the neutron-physical characteristics of the reactor campaign using different sets of nuclear data libraries for the WIMSD5B software product. *Nuclear and Radiation Safety*. No. 3 (67), 8-12. doi: 10.32918/nrs.2015.3(67).02.
22. Galchenko, V. V., Mishin, A. A., Shlapak, I. I. (2018). Constant provision of the subsystem of physical calculations SVRK-M "Voyage". *Nuclear Physics and Energy*, 2(19), 121–130.
23. Power Unit 2. Services for refining SVRK algorithms to ensure control of mixed fuel loading. (2016, November 09). NNEGC Energoatom. Retrieved March 13, 2022, from: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2016-10-25-000250-a>.
24. Implementation of fuel assemblies manufactured by Westinghouse at Zaporizhzhya NPP power plant. Development of a methodology for the preparation of constant support for the SVRK. (2016). SRPA "Impulse". Severodonetsk.
25. Galchenko, V. (2007). Date preparation comparison analysis using differential computer miracles. Part 2. *Nuclear and Radiation Technologists*. 7(3-4), 29-41.
26. Lux, I., Koblinger, L. (2000). Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations. Boca Raton. Florida: CRC Press. Inc., 530 p.
27. Briesmeister, J. F. (2000, December 18). MCNP - A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code (Version 4C). Radiation Safety Information Computational Center (RSICC). Retrieved March 13, 2022, from: <https://inspirehep.net/files/78c669e8d3bb59ccf6fb868a6061450c>.
28. LANL. *A General Monte Carlo N-Particle (MCNP) Transport Code*. Retrieved March 19, 2022, from: <https://mcnp.lanl.gov/>.
29. Galchenko, V. V., Gulik, V. I., Shlapak, I. I. (2016). Use of the Serpent software product based on the Monte Carlo method to calculate the characteristics of the fuel assembly of the WWER-1000 reactor. *Nuclear Physics and Energy*, 3(17), 250-258.
30. Leppänen, J. (2004). Serpent a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre. Retrieved March 13, 2022, from: <http://montecarlo.vtt.fi/index.htm>.
31. Leppänen, J., Pusa, M., Viitanen, T., Valtavirta, V., Kaltiaisenaho, T. (2014). The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 82, 142-150.
32. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. NEA/NSC/DOC. 2002. Retrieved March 13, 2022, from: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/nsc-doc2002-10.pdf>.

33. Galchenko, V., Shlapak, I., Gulik, V. (2017). Computational Benchmark for Fuel Assembly of VVER-1000 Using the Monte Carlo Serpent Code. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 1(33), 24-30.

34. National Nuclear Data Center (NNDC). (2022, March 7). Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR). Viktor Zerkin (NDS, International Atomic Energy Agency). Retrieved March 19, 2022, from: <https://www-nds.iaea.org/exfor/>.

35. NEA Data Bank. Management Board for the Development, Application and Validation of Nuclear Data and Codes (MBDAV). Nuclear Energy Agency (NEA). Retrieved March 13, 2022, from: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28124/about-the-data-bank.

36. Viitanen, T., Leppänen, J. (2016). Calculating Neutron Dosimeter Activation in VVER-440 Surveillance Chains with Serpent. *26th AER Symposium on VVER Reactor Physics and Reactor Safety (October 10-14)*. Helsinki, Finland.

37. Viitanen, T., Leppänen, J. (2014). Validating the Serpent Model of FIR 1 Triga Mk-II Reactor by Means of Reactor Dosimetry. *EPJ Web of Conferences*, 106.

38. Aufero, M., Brovchenko, M., Cammi, A., Clifford, I., Geoffroy, O., Heuer, D., Laureau, A., Losa, M., Luzzi, L., Merle-Lucotte, E., Ricotti, M., Rouch, H. (2014). Calculating the effective delayed neutron fraction in the molten salt fast reactor: Analytical, deterministic and Monte Carlo approaches. *Annals of Nuclear Energy*, 65, 78-90.

39. Leppänen, J., DeHart, M. (2009). HTGR reactor physics and burnup calculations using the Serpent Monte Carlo code. *American Nuclear Society Transactions*, 101, 782-784.

40. Gulik, V., Tkaczyk, A. H. (2014). Cost optimization of ADS design: Comparative study of externally driven heterogeneous and homogeneous two-zone subcritical reactor systems. *Nuclear Engineering and Design*, 270, 132-142.

41. Leppänen, J. (2019, October 5). Serpent Code Wiki: user Manual for Serpent 2. Retrieved March 19, 2022, from: http://serpent.vtt.fi/mediawiki/index.php/Main_Page.

42. Chadwick, M., Obložinský P., Herman M., Greene, N. M. (2006). ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. *Nuclear Data Sheets*. 102, 2931-3060.

43. Obložinsky, P. (2008). International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007. *New ENDF/B-7.0 library*. Upton.

44. V. d. Marck, S.C. (2012). Benchmarking ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0 and JEFF-3.1.1 with MCNP6. *Nuclear Data Sheets*. 113, 2935-3005.

45. Qualification of the calculated Monte Carlo code Serpent for the preparation of constant support for the diffusion calculation of WWER reactors. (2020). SRPA "Impulse". Severodonetsk. Luhansk region. Ukraine.

Serpent 2 Code Validation to Determine the VVER-1000 Nuclear Fuel Neutron Multiplication Factor within Group Constant Generation for NPP In-Core Monitoring Systems

O. Trofymenko, A. Yakimchuk, I. Cherepanov, I. Romanenko, V. Gulik, M. Holiuk, O. Khotiaintseva, P. Kutsyn, A. Nosovskyi

Institute for Safety Problems of NPPs of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The validation of the group constant generation with the Serpent 2 code is presented. The validation modeling was performed by comparison with other neutronic codes. The description of the validation model and data for comparison were taken from the benchmark "A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark, NEA/NSC/DOC(2002)10", which presents the calculated neutronic characteristics of a VVER-1000 fuel assembly with the following such codes: MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MCNP4B, and MULTICELL. A comparison was also made with the Serpent 1 version, which is the predecessor of the considered Serpent 2 code. The results indicate that the Serpent 2 calculation is correct and can be used at the same level with the TVS-M and HELIOS codes, which are used for group constant generation for in-core monitoring systems of Ukrainian nuclear power plants. In all simulations, the deviation of the neutron multiplication factor is less than 0.38% relative to the average value between the codes MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL. Such deviations indicate a similar behavior of all computational models and the estimated nuclear data libraries applied to them. The largest relative deviations of Serpent 2 are observed with increasing depth of fuel burnout, especially compared to the TVS-M code. The smallest deviations and the best consistency of the results are observed compared to the HELIOS code. The scientific results presented in this paper are based on the technical report "Qualification of the calculated Monte Carlo code Serpent for the preparation of constant software for diffusion calculation of VVER reactors". Based on this report, the Serpent 2 code version 2.1.30 based on the Monte Carlo method was added to the list of codes recommended by Energoatom for the calculation of VVER reactors.

Keywords: neutronic calculation, Serpent, Monte Carlo method, multiplication factor, calculation codes, validation, benchmark, VVER-1000.

Отримано 30.03.2022