

**О. Р. Трофименко<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Носовський<sup>1</sup>, В. І. Гулік<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна*<sup>2</sup> *Кафедра АЕС та ІТФ, ТЕФ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: trofymenko.kotlov@gmail.com

**ВАЛІДАЦІЯ МОНТЕ-КАРЛО КОДУ SERPENT  
НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ  
НА ДОСЛІДНИЦЬКІЙ ПІДКРИТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ**

Представлено опис комп'ютерної моделі підкритичної установки Київського університету КУСА, розробленої за допомогою Монте-Карло коду Serpent. Виконано моделювання розмножуючих властивостей підкритичної установки. Пораховано ефективні коефіцієнти розмноження для різних критичних експериментів на дослідницькій підкритичній установці КУСА. Представлені результати розрахунку було порівняно з експериментальними результатами та результатами розрахунків інших Монте-Карло кодів.

*Ключові слова:* підкритична система, валідація розрахункових кодів, метод Монте-Карло, розрахунковий код Serpent, розрахунок ефективних коефіцієнтів розмноження.

**1. Вступ**

Розвиток у напрямку створення нових експериментальних, а в майбутньому й комерційних підкритичних ядерних систем, керованих зовнішнім джерелом нейтронів (ADS), неможливий без етапу попереднього нейтронно-фізичного та теплогідрравлічного моделювання подібних систем з метою аналізу їхньої поведінки під час експлуатації, оцінки безпеки та економічних характеристик. Розробка нових комп'ютерних кодів і збір ядерних даних для аналізу ADS є дуже важливими аспектами в напрямку моделювання підкритичних ядерних систем. Саме тому у грудні 2005 р. МАГАТЕ розпочало роботу над дослідницьким проектом під назвою “Analytical and Experimental Benchmark Analyses of Accelerator Driven Systems” [1]. Загальною метою проекту було розширення можливостей в розробці і застосуванні передових реакторних технологій в області підкритичних систем [1]. У рамках проекту було виконано моделювання та експерименти на демонстраційних підкритичних системах, керованих зовнішнім джерелом нейтронів, наприклад YALINA (Білорусь) [2], КУСА (Японія) [3, 4]. При цьому метою експериментів було сприяння дослідженням і розробці ADS, а також валідація обчислювальних методів і процедур, які можуть бути використані для цього [1].

Метою представленої роботи є валідація нового Монте-Карло коду Serpent і обчислювальних процедур, що використовуються для моделювання перспективних ядерних підкритичних систем, керованих зовнішнім джерелом ней-

тронів, а саме дослідження застосовності розрахункового коду Serpent [5, 6] для моделювання підкритичної системи КУСА Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI), експерименти з якою були проведені у грудні 2012 р. [3] і січні 2015 р. [4].

Безпосередньо валідація полягає в порівняльному аналізі розрахункових результатів, отриманих за допомогою Serpent, експериментальних результатів КУСА, а також результатів, отриманих в Атомному центрі Барілочче, Аргентина [7] за допомогою розрахункових кодів MCNP-6 [8] і KENO-VI [9].

У даній статті коротко описано різні конфігурації підкритичної системи Київського університету КУСА, з якою були проведені експерименти у грудні 2012 р. [3], а також представлені результати розрахунків ефективних коефіцієнтів розмноження за допомогою Монте-Карло коду Serpent версії 2.1.26. При цьому використовувалась бібліотека оцінених ядерних даних ENDF-B-VII.0 [10].

**2. Розрахунковий код Serpent**

Serpent — це багатоцільовий Монте-Карло код, який був розроблений у Технічному науково-дослідному центрі VTT у Фінляндії [5]. У ньому крім стандартної задачі критичності може вирішуватися також задача зміни ізотопного складу з часом (як у режимі «вигорання» палива, так і в режимі «розпаду»). Розробка коду Serpent почалася у 2004 р., і на даний момент перша версія коду безкоштовно розповсюджується через банк даних ОЕСР/NEA та RSICC з 2009 р.

© О. Р. Трофименко, А. В. Носовський, В. І. Гулік, 2018

Перш за все Serpent розроблявся як інструмент для розрахунку критичних реакторних систем із тепловим та швидким спектрами нейтронів. Згодом його почали використовувати і для розрахунку підкритичних реакторних систем, керованих зовнішнім джерелом нейтронів, оскільки розробники Serpent додали в код модуль «зовнішнього джерела нейтронів». На даний момент Serpent, на відміну від інших Монте-Карло кодів, здатен моделювати роботу ADS з урахуванням роботи зовнішнього джерела нейтронів, а також моделювати вигорання ядерного палива (за рахунок доданого розробниками режиму «вигорання»). Наприклад, у рамках проекту FP7 EUROATOM FREYA, очолюваного Бельгійським центром ядерних досліджень (SCK CEN) і виконаним у період 2011 - 2016 рр., було проведено ряд експериментів на об'єкті VENUS-F. При цьому однією з основних цілей FREYA було дослідження і перевірка методів моніторингу реактивності [2]. Тому під час проекту FREYA в SCK CEN одночасно застосовувалися розрахункові коди MCNP5 і Serpent2 з метою порівняння розрахункових результатів з експериментальними даними, а також з метою дослідження застосовності Serpent для моделювання VENUS-F [11].

Наступними прикладами є аналіз використання Монте-Карло коду Serpent для виконання повних тривимірних розрахунків, включаючи вигорання для дослідницького реактора OPAL Research Reactor [3], а також застосування кодів

Serpent і MCNP для моделювання підкритичної експериментальної установки YALINA в Білорусі [13].

### 3. Опис моделі підкритичної системи KUCA

Із джерела [3] для моделювання та розрахункового аналізу було обрано експерименти фази 1, серії 1, випадків конфігурації з I-1 по I-4. Фаза 1 полягала в дослідженні розмножуючих властивостей підкритичної системи без роботи зовнішнього джерела нейтронів залежно від глибини занурення регулюючих поглинаючих стрижнів.

Кожна з конфігурацій активної зони підкритичної системи KUCA має певний набір чарунок: паливні збірки, відбивач, екрануючі елементи. Крім цього, присутні інші компоненти: регулюючі/захисні стрижні, детектори. Безпосередньо чарунка являє собою конструкцію заввишки 152,4 см, яка має квадратний поперечний переріз і по висоті складається з блоків різних матеріалів у формі прямокутних паралелепіпедів. Матеріали, які були використані при моделюванні випадків з I-1 по I-4, наведено в [3]. Кожному матеріалу при моделюванні в середовищі Serpent було дано відповідне позначення [3]. Кожній чарунці було присвоєно ідентифікуючий номер. Схематичне представлення конструкції змодельованих чарунок у координатах Z-Y, а також відповідні ідентифікуючі номери в моделі Serpent показано на рис. 1, 2 та 3.

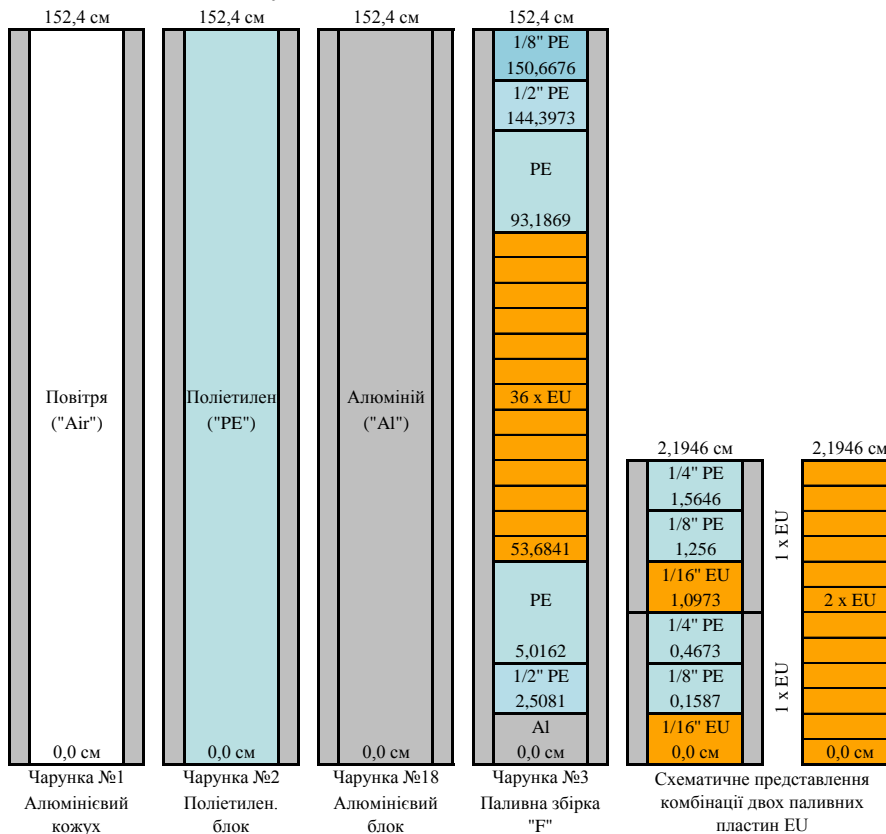


Рис. 1. Схематичне представлення конструкції чарунок 1, 2, 18, 3. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

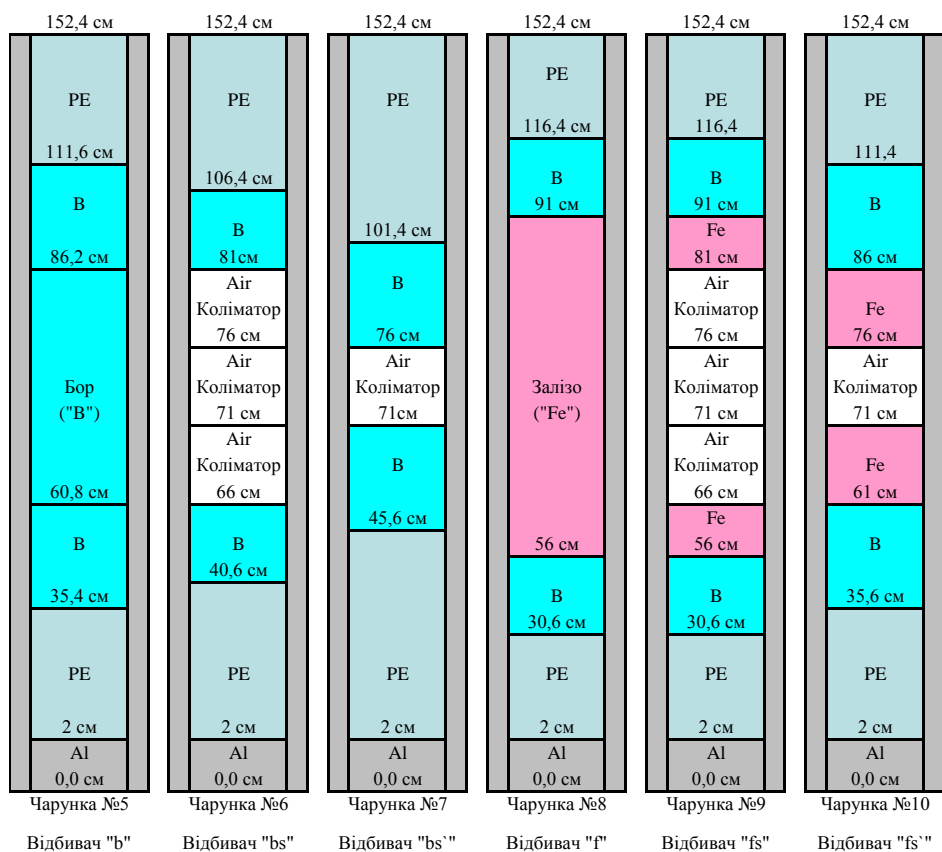


Рис. 2. Схематичне представлення конструкції чарунок 5, 6, 7, 8, 9, 10.  
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

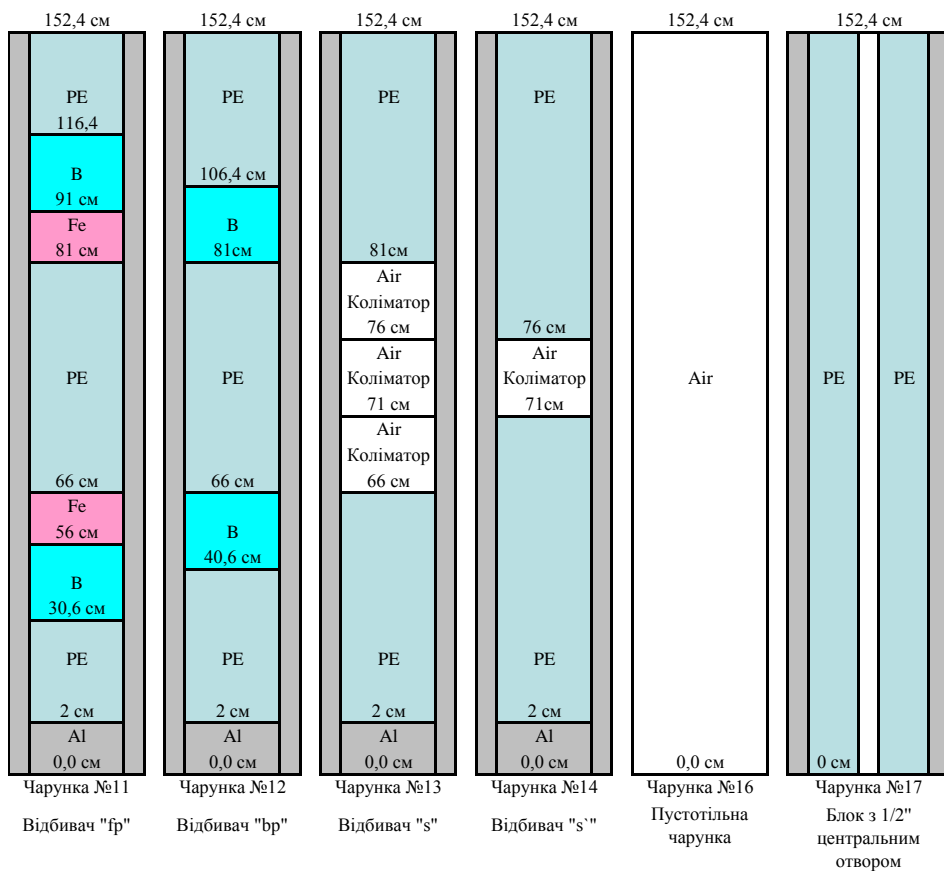


Рис. 3. Схематичне представлення чарунок 11, 12, 13, 14, 16, 17.  
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Верхня і нижня частини паливних чарунок мають блоки з поліетиленового відбивача. Паливні пластини складаються з уран-алюмінієвого сплаву (U-Al), збагаченого на рівні 93 % по урану-235. Паливна чарунка типу "F" (№ 3) має в собі сердечник з 36 окремих елементів, кожен з яких утворений поліетиленовими пластинами завтовшки 1/8 дюйма (PE8) і 1/4 дюйма (PE4), а також пластиною товщиною 1/16 дюйма зі сплаву U-Al (EU) (див. рис. 1). Ефективна висота сердечника "F" становить приблизно 40 см.

Деякі чарунки мають коліматор, детальна конструкція якого наведена в [3]. Кожна чарунка й паливна збірка має алюмінієву оболонку/кожух товщиною 0,15 см, крім чарунки № 16, яка представляє собою повітряний простір.

**4. Моделювання критичного, підкритичного та надкритичного станів KUCA**

При проведенні експериментів з підкритичною системою KUCA регулювання рівня підкритичності виконувалося шляхом підтримки регулюючих поглинаючих стрижнів у певних положеннях (на певній висоті) відповідно до [3].

Підкритичний стан при проведенні експериментів з KUCA було забезпечено повним зануренням регулюючих стрижнів C1 (№ 151), C2 (№ 152), C3 (№ 153). При цьому важливо відзначити, що всі захисні стрижні S4 (№ 154), S5 (№ 155), S6 (№ 156) було повністю вилучено з активної зони підкритичної системи.

Критичний стан для кожного експерименту забезпечувався підтриманням регулюючого стрижня C3 (№ 153) на певній висоті над базою підкритичної системи.

Як зазначено в [3], надкритичний стан було «прогнозовано методом зворотного періоду на основі градуировочних кривих» при повному вилученні регулюючих та захисних стрижнів з активної зони підкритичної системи.

Схематичне представлення регулюючого/захисного поглинаючого стрижня представлено на рис. 4. Ідентифікуючі номери регулюючих і захисних стрижнів, а також висота їхнього підняття відносно нижньої границі (базис) підкритичної системи, що відповідала критичному стану системи при проведенні експерименту, подано в табл. 1.

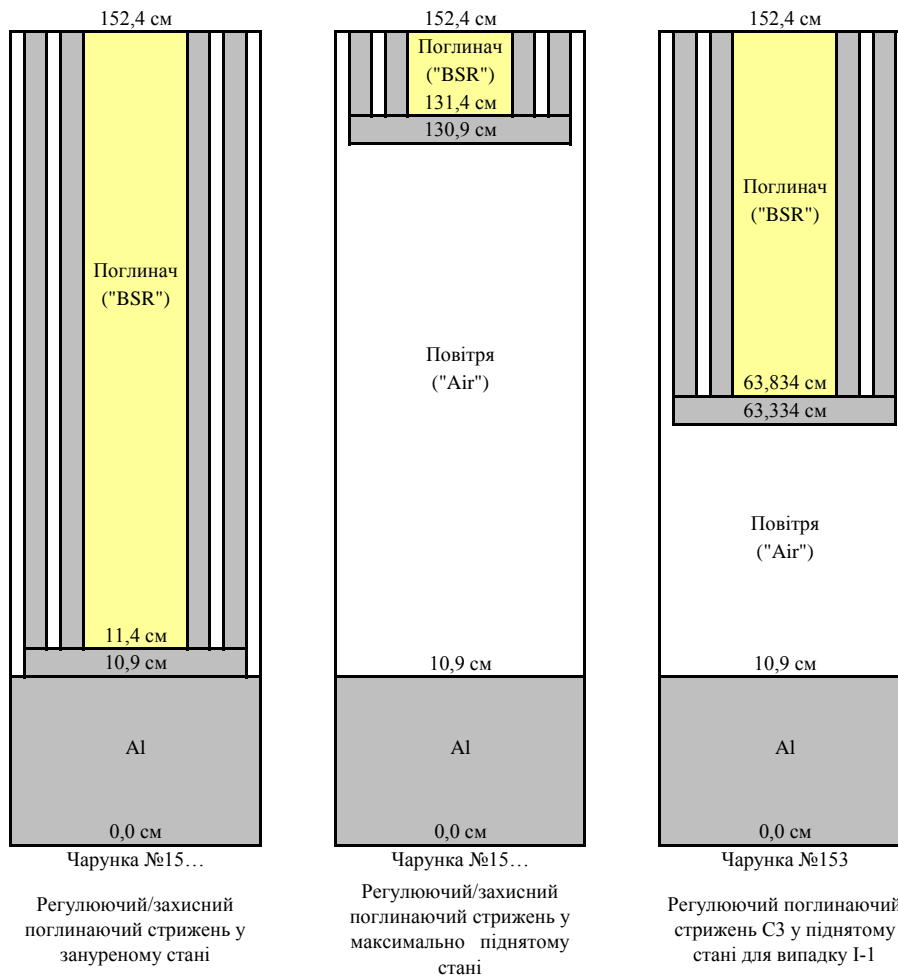


Рис. 4. Схематичне представлення конструкції поглинаючих/захисних стрижнів. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Таблиця 1. Висота підймання поглинаючих стрижнів відносно нижньої границі підкритичної системи для різних конфігурацій КУСА [3]

Ідентифікуючий номер стрижня в моделі Serpent	№ 151	№ 152	№ 153	№ 154	№ 155	№ 156
Позначення згідно з [3]	"C1"	"C2"	"C3"	"S4"	"S5"	"S6"
Конфігурація КУСА	Висота підймання стрижнів відносно нижньої границі підкритичної системи, см					
I-1	130,9	130,9	63,834	130,9	130,9	130,9
I-2	130,9	130,9	66,221	130,9	130,9	130,9
I-3	130,9	130,9	85,954	130,9	130,9	130,9
I-4	130,9	130,9	63,952	130,9	130,9	130,9

На рис. 5 показано загальний вигляд зверху (у координатах X-Y) підкритичної системи КУСА на прикладі конфігурації для експерименту I-1. У нижній частині рис. 5 положення джерела нейт-

ронів показано чорною стрілкою (лінія пучка дейтронів та мішень). Поперечний переріз чарунки та поглинаючого стрижня схематично зображено на рис. 6.

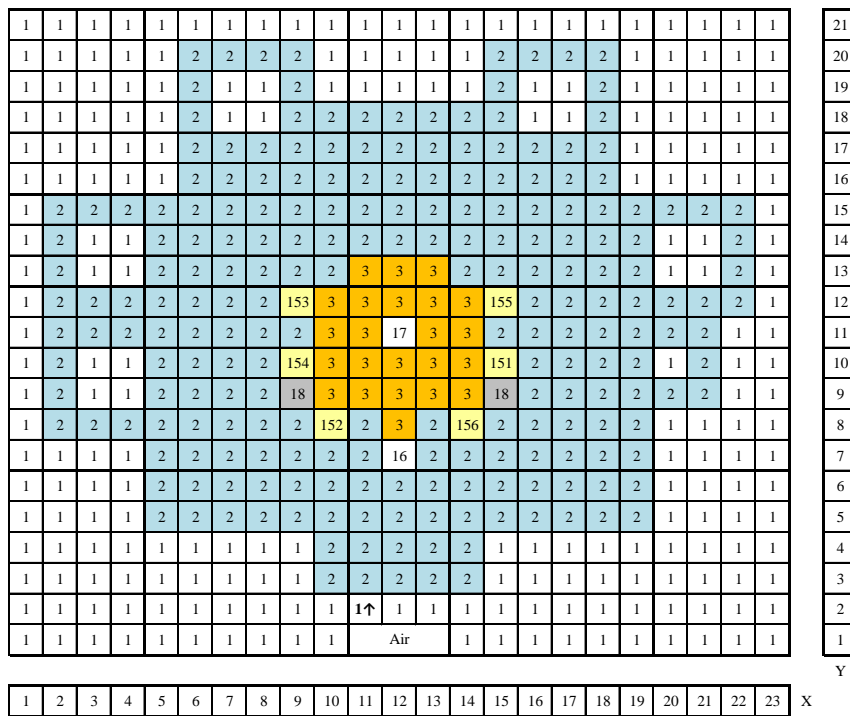


Рис. 5. Конфігурація КУСА моделі Serpent для випадку I-1. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

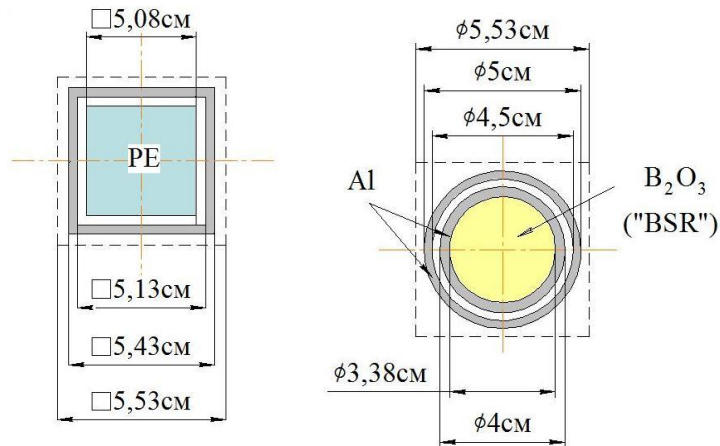


Рис. 6. Поперечний переріз чарунки та поглинаючого стрижня. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Система складається з 483 чарунок. Конфігурації кожної з розрахункових моделей (I-1 - I-4) наведено на рис. 7. Для вимірювання швидкості розподілу реакцій у центральній області підкритичної системи ( $Z = 73,5$  см,  $X = 72,39$  см,  $Y = [5,53$  см;  $66,56$  см]) було розміщено індійський дріт діаметром 1,5 мм і довжиною близько 60 см [3]. Зазначені в [3] камери поділу (FC1-3 - позиції (Y-18,19; X-7,8), (Y-13,14; X-20,21), (Y-13,14;

$X -3,4)$ ), детектори UIC (UIC4, UIC5 - позиції (Y-18,19; X-16,17), (Y-9,10; X-3,4)), а також джерело нейтронів (N, позиція (Y-10, X-20)) замінені на чарунки типу № 1 (дані щодо структури та матеріального складу цих компонентів не наведено в [3]). Позиції (Y-1; X-11, X-12, X-13) припускають розміщення каналу прискорювача заряджених частинок. Чарунки у відповідних позиціях відсутні, а простір заповнений повітрям.

14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	153	3	3	3	3	3	3	155	2	2	2	2	2	2
11	2	2	3	3	17	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	154	3	3	3	3	3	3	151	2	2	2	2	2	2
9	2	18	3	3	3	3	3	3	18	2	2	2	2	2	2
8	2	2	152	2	3	2	156	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	Air			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Y															
X	8	9	10	11	12	13	14	15	16						

Конфігурація KUCA I-1

14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	153	3	3	3	3	3	3	155	2	2	2	2	2	2
11	2	2	3	3	17	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	154	3	3	3	3	3	3	151	2	2	2	2	2	2
9	2	18	3	3	3	3	3	3	18	2	2	2	2	2	2
8	2	2	152	2	3	2	156	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	5	5	7	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	1	5	5	7	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	8	8	10	8	8	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	Air			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Y															
X	8	9	10	11	12	13	14	15	16						

Конфігурація KUCA I-2

14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	153	3	3	3	3	3	3	155	2	2	2	2	2	2
11	2	2	3	3	17	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	154	3	3	3	3	3	3	151	2	2	2	2	2	2
9	2	18	3	3	3	3	3	3	18	2	2	2	2	2	2
8	2	2	152	2	3	2	156	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	13	16	13	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	13	13	13	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	5	6	6	6	5	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	1	5	6	6	6	5	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	8	9	9	9	8	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	Air			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Y															
X	8	9	10	11	12	13	14	15	16						

Конфігурація KUCA I-3

14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	153	3	3	3	3	3	3	155	2	2	2	2	2	2
11	2	2	3	3	17	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	154	3	3	3	3	3	3	151	2	2	2	2	2	2
9	2	18	3	3	3	3	3	3	18	2	2	2	2	2	2
8	2	2	152	2	3	2	156	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	1	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	8	8	8	8	8	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	Air			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Y															
X	8	9	10	11	12	13	14	15	16						

Конфігурація KUCA I-4

Рис. 7. Конфігурації розрахункових моделей I-1...4. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

### 5. Результати Serpent розрахунку та аналіз отриманих результатів

Експериментальні дані ефективних коефіцієнтів розмноження і ті, що були розраховані за допомогою Serpent, представлені в табл. 2 і 3.

Результати, представлені у [3] в одиницях реактивності, були перераховані в ефективні коефіцієнти розмноження як

$$\rho = \frac{K_{\text{эф}} - 1}{K_{\text{эф}}}$$

Таблиця 2. Результати чисельного аналізу ефективних коефіцієнтів розмноження експериментів KUCA серії I

Експеримент	Джерело результатів	Підкритичний стан (п.с.)	Критичний стан (к.с.)	Надкритичний стан (н.с.)
		$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{эф}}$
I-1	EXP	0,9910	1,0000	1,0030
	Serpent	0,9978	1,0051	1,0084
I-2	EXP	0,9908	1,0000	1,0029
	Serpent	0,9972	1,0047	1,0084
I-3	EXP	0,9884	1,0000	1,0002
	Serpent	0,9944	1,0049	1,0051
I-4	EXP	0,9910	1,0000	1,0030
	Serpent	0,9978	1,0053	1,0072

Таблиця 3. Різниця між значеннями ефективного коефіцієнта розмноження серії I

Експеримент	Різниця результатів	Підкритичний стан (п.с.)	Критичний стан (к.с.)	Надкритичний стан (н.с.)
		$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{эф}}$
I-1	EXP-Se	-0,0068	-0,0051	-0,0054
I-2	EXP-Se	-0,0064	-0,0047	-0,0055
I-3	EXP-Se	-0,0059	-0,0049	-0,0049
I-4	EXP-Se	-0,0068	-0,0053	-0,0043

Примітка (до табл. 2 і 3). EXP – експериментальні результати, згідно з [3]; Serpent – результати, отримані за допомогою розрахункового коду Serpent у ході виконання представленої роботи; (EXP-Se) – різниця між експериментальними результатами і результатами, отриманими за допомогою розрахункового коду Serpent.

Чисельний аналіз експериментальних даних KUCA [3] було виконано з використанням розрахункового коду Монте-Карло Serpent та бібліотеки оцінених ядерних даних ENDF/B-VII.0, яка була включена в пакет Serpent. Для врахування теплового розсіювання нейтронів у поліетилені була використана бібліотека теплового розсіювання нейтронів ENDF71SaB poly.20t [14]. Слід зауважити, що більшість українських організацій не мають доступу до сучасних бібліотек оцінених ядерних даних, тому у представлених розрахунках було використано старішу версію бібліотеки теплового розсіювання нейтронів у поліетилені.

Serpent використовувався для всіх обчислень ефективного коефіцієнта розмноження. Опція "set pop 5000 1000 100", де "5000" – кількість нейтронів за цикл, "1000" – число запущених активних циклів, "100" – число запущених неактивних циклів [6], використовувалася для розрахунку критичності, з точно визначеними в експерименті позиціями регулюючих і захисних стрижнів, а також розрахунку надмірної реактивності у випадку, коли всі регулюючі стрижні підняті на

100 % (120 см + 11,4 см = 131,4 см над нижньою границею підкритичної системи). Важливо зазначити, що всі захисні поглинаючі стрижні були максимально підняті у всіх випадках.

Згідно з отриманими результатами для всіх розглянутих конфігурацій підкритичної системи KUCA значення, розраховані за допомогою Serpent, перевищують експериментальні значення, а саме:

1. Середня для всіх випадків конфігурацій KUCA різниця між ефективними коефіцієнтами розмноження розрахованими у Serpent та експериментальними значеннями – 0,0055.

2. Максимальна розбіжність  $K_{\text{эф}}$  між Serpent та експериментальними значеннями – 0,0068 для випадку I-1 у підкритичному стані.

3. Мінімальна розбіжність  $K_{\text{эф}}$  між Serpent та експериментальними значеннями – 0,0043 для випадку I-4 у надкритичному стані.

Статистичне відхилення при розрахунку  $K_{\text{эф}}$  у Serpent становить 0,056 %. Число нейтронних історій, що відслідковуються в одному розрахунку, відповідає  $5 \cdot 10^6$ .

При розрахунку у Serpent використовувалася версія розрахункового коду «Serpent 2.1.26». При цьому для виконання всіх розрахунків був використаний розрахунковий сервер з такими параметрами: процесор Intel (R) Pentium (R) CPU G4400 @ 3,30GHz та оперативна пам'ять 16 Гб.

Також, у рамках співпраці, отримані результати Serpent були порівняні (табл. 4) з результатами розрахунків, виконаних у MCNP6 та KENO-VI доктором Франциско Лещинським (Атомний центр Барілочче, Аргентина) [5].

Таблиця 4. Різниця між значеннями ефективного коефіцієнта розмноження серії I, розрахованими у Serpent, MCNP6 та KENO-VI

Експеримент	Різниця результатів	Підкритичний стан (п.с.)	Критичний стан (к.с.)	Надкритичний стан (н.с.)
		$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{эф}}$
I-1	MC-Se	-0,0017	-0,0009	-0,0010
	KE-Se	-0,0081	-0,0081	-0,0087
I-2	MC-Se	-0,0015	-0,0009	-0,0016
	KE-Se	-	-0,0080	-
I-3	MC-Se	-0,0010	-0,0015	-0,0012
	KE-Se	-	-0,0069	-
I-4	MC-Se	-0,0017	-0,0011	-0,00005
	KE-Se	-	-0,0078	-

П р и м і т к а. (MC-Se) – різниця між результатами MCNP розрахунку і результатами Serpent розрахунку; (KE-Se) – різниця між результатами KENO-VI розрахунку і результатами Serpent розрахунку.

Згідно з наданими результатами розрахункового аналізу серії I експериментів KUCA у MCNP6 та KENO-VI було встановлено:

1. Середня для всіх випадків конфігурацій KUCA різниця між ефективними коефіцієнтами розмноження, розрахованими у Serpent та MCNP, – 0,0012.

2. Максимальна розбіжність  $K_{\text{эф}}$  між Serpent та MCNP – 0,0017 для випадку I-1 у підкритичному стані.

3. Мінімальна розбіжність  $K_{\text{эф}}$  між Serpent та MCNP – 0,00005 для випадку I-4 у надкритичному стані.

4. Середня для всіх випадків конфігурацій KUCA різниця між ефективними коефіцієнтами розмноження, розрахованими у Serpent та KENO-VI – 0,008.

Аналіз експериментів I-2, 3, 4 за допомогою KENO-VI проводився лише для критичного стану.

Статистичне відхилення при розрахунку  $K_{\text{эф}}$  у MCNP становить 0,008 %. Число нейтронних історій, що відслідковуються в одному розрахунку, відповідає  $1 \cdot 10^8$  [5].

Статистичне відхилення при розрахунку  $K_{\text{эф}}$  у KENO-VI становить 0,02 %. Число нейтронних історій, що відслідковуються в одному розрахунку, відповідає  $2,5 \cdot 10^7$  [5].

Для MCNP та KENO-VI моделювання вченими з Аргентини були використані більш нова бібліотека оцінених ядерних даних ENDF/B-VII.1 та сучасна бібліотека для теплового розсіювання нейтронів у поліетилені.

З вищенаведеного моделювання можна дійти висновку, що результати Serpent дають задовіль-

ну точність розрахунку та є досить близькими до тих, які були отримані при моделюванні в MCNP, при цьому менш близькі до результатів, отриманих в KENO-VI. Подібне співвідношення результатів, отриманих за допомогою розрахункових кодів MCNP та Serpent, спостерігалось і при розрахунку ефективних коефіцієнтів розмноження для інших підкритичних систем VENUS [9] та YALINA [11]. У наведених статтях результати Serpent розрахунку також перевищували результати, отримані в MCNP.

## 6. Висновки

Було описано розроблену тривимірну модель японської дослідницької системи KUCA за допомогою нового Монте Карло коду Serpent. При цьому в розрахунковій моделі було максимально враховано всі геометричні та матеріальні характеристики системи.

Виконано розрахунок ефективних коефіцієнтів розмноження для конфігурацій системи KUCA з I-1 по I-4.

Отримані результати Serpent моделювання було порівняно з експериментальними даними та результатами моделювання, виконаними в інших Монте Карло кодах: MCNP6 та KENO-VI.

Аналіз отриманих результатів показує, що результати Serpent моделювання гірше узгоджуються з експериментальними даними, ніж результати MCNP6 моделювання. Різницю з MCNP6 моделюванням можна пояснити тим, що в MCNP6 розрахунках було використано більш нову бібліотеку теплового розсіювання нейтронів



на поліетилені, ніж для Serpent розрахунку. При цьому результати KENO-VI моделювання більше відрізняються від результатів MCNP6 та Serpent.

Новий Монте-Карло код Serpent 2.1.26 може бути використаний для подальшого моделювання та розрахункового аналізу нових конфігурацій підкритичної системи Кіотського університету KUCA одночасно з MCNP6 та KENO-VI з метою поглибленого дослідження існуючих розбіжностей у результатах або як аналог MCNP6 з урахуванням представлених у статті розбіжностей. Використання Serpent 2.1.26 як аналог KENO-VI згідно з отриманими результатами на даний час не рекомендується без додатково проведених досліджень.

Автори висловлюють вдячність д-ру Франциско Лещинському (Атомний центр Барілочче, Аргентина) за допомогу в підготовці цієї статті та представлені дані розрахунків у MCNP6 та KENO-VI і д-ру Схеол Хо Пеону (Кіотський університет, Дослідницький інститут реакторів, Японія) за представлені експериментальні дані.

This research was carried out with the financial support of the IAEA, within the terms and conditions of the Research Contract 20638 in the framework of the Coordinated Research Project (CRP) “Accelerator Driven Systems (ADS) Applications and use of Low-Enriched Uranium in ADS (T33002)” within the project “The Two-Zone Subcritical Systems with Fast and Thermal Neutron Spectra for Transmutation of Minor Actinides and Long-Lived Fission Products”.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. A. Abánades et al. IAEA coordinated research project (CRP) on “Analytical and experimental benchmark analyses of accelerator driven systems”. Proc. of the Int. Conf. on the Physics of Reactors “Nuclear Power: A Sustainable Resource”, Interlaken, Switzerland, September 14 - 19, 2008.
2. C. Persson et al. Pulsed neutron source measurements in the subcritical ADS experiment YALINA-booster. *Annals of Nuclear Energy* 35 (2008) 2357.
3. Cheol Ho Pyeon (Ed). *Experimental Benchmarks for Accelerator-Driven System (ADS) at Kyoto University Critical Assembly*, KURRI-TR-444, Research Reactor Institute. Kyoto University, Japan, December 2012.
4. Cheol Ho Pyeon (Ed). *Experimental Benchmarks on Thorium-Loaded Accelerator-Driven System at Kyoto University Critical Assembly*, KURRI-TR (CD) - 48, Research Reactor Institute. Kyoto University, Japan, January 2015.
5. Serpent: <http://montecarlo.vtt.fi/>
6. J. Leppänen et al. The SERPENT Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Ann. Nucl. Energy* 82 (2015) 142.
7. F. Leszczynski. Analysis of KUCA experiments. Centro Atomico Bariloche, Argentina, March 2017.
8. *MCNP6 Users manual - Code version 6.1.0, LA-CP-13-00634, Rev. 0, Los Alamos National Laboratory, May 2013.*
9. B.T. Rearden, M.A. Jessee (ed.). *SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39 Version 6.2, April 2016 (Chapter 8.1 KENO: A Monte Carlo Criticality Program).*
10. M.B. Chadwick et al. ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. *Nucl. Data Sheets* 112 (2011) 2887.
11. E. Fridman, A. Kochetkov, A. Krása. Modeling of FREYA fast critical experiments with the Serpent Monte Carlo code. *Annals of Nuclear Energy* 108 (2017) 239.
12. D. Ferraro, E. Villarino. Full 3-D core calculations with refueling for the OPAL Research Reactor using Monte Carlo Code Serpent 2. *Annals of Nuclear Energy* 92 (2016) 369.
13. A. Talamo, Y. Gohar, J. Leppänen. SERPENT validation and optimization with mesh adaptive search on stereolithography geometry models. *Annals of Nuclear Energy* 115 (2018) 619.
14. J.L. Conlin et. al. *Listing of Available ACE Data Tables (formerly known as Appendix G of the MCNP Manual)*. Nuclear Data Team, XCP-5, Los Alamos National Laboratory, June 26, 2014.

А. Р. Трофименко<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Носовский<sup>1</sup>, В. И. Гулик<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина*

<sup>2</sup> *НТУУ «КПИ имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

\*Ответственный автор: trofymenko.kotlov@gmail.com

#### ВАЛИДАЦИЯ МОНТЕ-КАРЛО КОДА SERPENT НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

Представлено описание компьютерной модели подкритической установки Киотского университета KUCA, которая была разработана с помощью Монте-Карло кода Serpent. Выполнено моделирование размножающих свойств подкритической установки. Были посчитаны эффективные коэффициенты размножения для разных

критических экспериментов на исследовательской подкритической установке КУСА. Представленные результаты расчетов были сравнены с экспериментальными данными и результатами расчетов другими кодами Монте-Карло.

*Ключевые слова:* подкритическая система, валидация расчетных кодов, метод Монте-Карло, расчетный код Serpent, расчет эффективных коэффициентов размножения.

**O. P. Trofymenko<sup>1,2,\*</sup>, A. V. Nosovsky<sup>1</sup>, V. I. Gulik<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Institute for Safety Problems of NPP, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup> *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: trofymenko.kotlov@gmail.com

**MONTE-CARLO SERPENT CODE VALIDATION BASED  
ON THE EXPERIMENTAL DATA FROM RESEARCH SUBCRITICAL FACILITY**

Description of computation model for Kyoto University Critical Assembly (KUCA) developed with the help of Monte-Carlo Serpent code was presented in this paper. The simulation of criticality and subcriticality conditions for KUCA was carried out. The effective multiplication factors for different critical experiments were calculated for KUCA. The presented obtained results were considered and compared with the experimental data and with computation results from other Monte Carlo codes.

*Keywords:* subcritical system, code validation, Monte-Carlo method, Serpent code, effective multiplication factor calculation.

Надійшла 10.08.2018

Received 10.08.2018