

М. І. Голюк, О. М. Хотяїнцева, В. М. Хотяїнцев, А. В. Носовський, В. І. Гулік

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

Оптимізація часу і статистичної похибки розрахунку біологічного захисту контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива

Ключові слова:

Монте-Карло код Serpent, контейнер HI-STORM 190, радіаційний захист, зменшення дисперсії, глобальне зменшення дисперсії, показник якості

Захист від радіаційного випромінювання є важливим завданням під час експлуатації атомних електростанцій та джерел радіоактивного випромінювання, до яких належать і сховища відпрацьованого ядерного палива. Метод Монте-Карло є одним з ефективних методів розрахунку параметрів радіаційного захисту та характеристик поля випромінювання для складних геометрій. Однак досягнення задовільної статистичної похибки результатів під час моделювання проходження нейтронів і фотонів через біологічний захист може вимагати надмірно великого часу розрахунку. Для вирішення цієї проблеми Монте-Карло коди використовують методи зменшення дисперсії для спрямування частинок у регіони з детекторами, щоб підвищити статистичну точність. У статті представлено застосування функції зменшення дисперсії на основі вагових вікон у Монте-Карло коді Serpent, функцію досліджено на прикладі спрощеної 2D-моделі контейнера зберігання відпрацьованого ядерного палива HI-STORM 190. Показано, що використання функції зменшення дисперсії приводить до значного зменшення статистичної похибки і скорочення часу розрахунку, а отже може бути корисним для розрахунків біологічного захисту.

Вступ

Зараз в Україні вводиться в експлуатацію Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива з контейнерами HI-STORM 190, тому питання дослідження радіаційного захисту є актуальним. Надійний радіаційний захист персоналу та населення від іонізуючого випромінювання є важливим фактором для безпечної експлуатації АЕС, інших ядерних установок, сховищ відпрацьованого ядерного палива, установок для переробки радіоактивних відходів, промислового, наукового та медичного обладнання, в якому використовуються джерела іонізуючого випромінювання. Захист має бути ефективним: він повинен забезпечувати ослаблення іоні-

зуючого випромінювання і водночас мати прийнятну вартість. Для створення ефективного захисту потрібні точні дані про радіаційне поле навколо системи захисту й у матеріалах захисту, що отримують радіаційне навантаження. Метод Монте-Карло (статистичне моделювання) є одним з ефективних методів розрахунку параметрів захисту і характеристик поля випромінювання. Такі Монте-Карло коди, як MCNP та Serpent, дозволяють враховувати реальну складну геометрію і детальний матеріальний склад джерела та захисту.

Типовою проблемою розрахунків методом Монте-Карло є моделювання рідкісних подій, коли для досягнення необхідної точності час розрахунку непомірно зростає. Така проблема характерна і для

© М. І. Голюк, О. М. Хотяїнцева, В. М. Хотяїнцев, А. В. Носовський, В. І. Гулік, 2021

моделювання проходження нейтронів і фотонів через біологічний захист. Для її вирішення застосовуються спеціальні методи зменшення дисперсії. Методи зменшення дисперсії є в багатьох Монте-Карло кодах, цей метод також був реалізований у коді Serpent [1]. Функція зменшення дисперсії дозволяє значно покращити точність розрахунків перенесення нейтронів і фотонів [2]. За оцінками, виконаними розробниками коду Serpent, у разі використання функції зменшення дисперсії час розрахунку (за умов задачі зовнішнього джерела) може бути зменшено в сотні разів для досягнення необхідної точності вихідних даних. Функція зменшення дисперсії в коді Serpent основана на стандартній технології вагового вікна (standard weight-window techniques) [3, 4].

Монте-Карло код Serpent спочатку розроблявся тільки для моделювання перенесення нейтронів у реакторній фізиці [5]. Але протягом останніх кількох років було докладено значних зусиль до розширення можливостей коду, що виходять за межі нейтронних розрахунків ядерних установок. Серед таких впроваджень можна виділити розробку вдосконаленої автоматизованої функції САД-дизайну, впровадження неструктурованої геометрії на основі різних типів геометричної сітки, а також функції моделювання перенесення фотонів, джерела та об'єданого перенесення нейтронів і фотонів [6–9]. Ці можливості можуть бути дуже корисними для задач радіаційного перенесення та розрахунку захисних властивостей від іонізуючого випромінювання, у дослідженні термоядерного синтезу, медичній фізиці та інших галузях науки і техніки, що займаються активованими матеріалами та іншими джерелами випромінювання.

Метою статті було дослідити функцію зменшення дисперсії в програмі Serpent, проаналізувати результати та знайти оптимальні вхідні характеристики, які будуть практичними для майбутніх розрахунків і не будуть вимагати додаткового часу на розрахунок, а також підтвердити ефективність функції зменшення дисперсії.

Матеріали дослідження, експериментальна частина

Вагові вікна — це стандартний метод зменшення дисперсії в Монте-Карло кодах (MCNP та Serpent), який використовує так звані сітки важливості, накладені поверх змодельованої геометрії. В основному

цей метод використовується для завдань, пов'язаних із розрахунком радіаційного захисту. Методологія заснована на концепції важливості (concept of importance), яка, по суті, визначає внесок однієї частинки в заданому положенні, енергії та напрямку руху до заданої реакції. «Гра Монте-Карло» керується таким чином, що сприяє потоку частинок у напрямку зростання важливості, що робить його більш імовірним, і змодельовані історії сприяють бажаному результату. При цьому процесорний час не витрачається даремно на відстеження частинок, які, швидше за все, не дадуть жодного внеску в результат бажаного місця детектування.

Контроль популяції частинок у схемі зменшення дисперсії, основаній на ваговому вікні, здійснюється шляхом розділення частинок, які потрапляють в область більшої важливості, та припинення історії частинок, що не потрапляють в область більшої важливості. Кожному джерелу частинки присвоюється статистична вага W , зазвичай устанавлюється рівною одиниці при запуску історії частинки. Ця вага використовується як множник, коли підраховуються частинки в детекторі. Середньостатистичне значення, отримане з тисяч частинок з низькою вагою, може бути еквівалентне результату, який досягається лише кількома частинками з великою вагою. Оскільки асоційована дисперсія залежить від фактичного числа частинок, то перший вищенаведений випадок зазвичай приводить до вищої статистики.

Усякий раз, коли частинка потрапляє в область, де важливість змінюється, її вага порівнюється з нижньою та верхньою межами, що пов'язані з важливістю. Якщо вага нижче нижньої межі W_{lo} , історія такої частинки припиняється з імовірністю, пропорційною решті ваги:

$$P_{cut} \propto 1 - \frac{W}{W_{lo}}. \quad (1)$$

Якщо частинка виживає, її вага підвищується до $W/(1 - P_{cut})$. Ця процедура, широко відома як «російська рулетка», зменшує кількість частинок, що відстежуються в регіонах низької важливості при збереженні середньостатистичної ваги популяції частинок.

Частинки з вагою, що перевищує верхню межу W_{hi} , розділяються на кілька нових історій. Очікувана кількість частинок, що виходять з розділення, визначається як

$$v = \frac{W}{W_{hi}}. \quad (2)$$

Кількість розділень визначається, якщо взяти усічене ціле значення v і додати одну зайву частку з імовірністю

$$P = v - \text{trunc}(v). \quad (3)$$

Ваги встановлюються для W_{hi} . Поділ частинок збільшує розмір популяції в областях високої важливості. Хоча процес перенесення для окремої частинки може бути змінений, але моделювання зберігає перенесення середньостатистичної ваги.

Граничні ваги в рівняннях (1) і (2) зворотно пропорційні важливості. Замість того, щоб жорстко застосовувати межі (тобто $W_{lo} = W_{hi} = I^{-1}$), значення меж зазвичай поширюються на певний інтервал навколо зворотного значення важливості. Цей інтервал відомий як вагове вікно. Вага частинок залишається обмеженою, але «розділ/рулетку» не потрібно викликати кожного разу, коли важливість змінюється. Значення за замовчуванням, використовуваних Serpent 2, становлять $W_{lo} = 0,5I^{-1}$ та $W_{hi} = 2I^{-1}$.

Межі вагового вікна можуть бути пов'язані з різними подіями, такими як випромінювання частинок джерела, зіткнення та перетинання поверхні. Схема зменшення дисперсії, досліджена в цій статті, базується на ваговій віконній сітці, накладеній поверх геометрії, із значенням, визначеним для меж комірки сітки та зовнішніх джерел усередині комірки.

Код Serpent 2 дає змогу застосовувати технологію зменшення дисперсії як до дискретного детектора, до множини детекторів і для всього об'єму розглянутої геометрії (Global Variance Reduction (GVR)). Алгоритми матриці відгуків реалізовані в Serpent 2 як внутрішні підпрограми. Підтримувані типи геометричних сіток включають декартову, нерівномірну прямокутну, циліндричну та гексагональну сітки, а також самоадаптивну багатовимірну сітку. Користувач може задавати параметри сітки, відгуки, критерії збіжності та інші вхідні опції. Розрахунок починається зі звичайного Монте-Карло моделювання, що надає початкові значення для зв'язуючих коефіцієнтів. Вбудований вирішувач далі генерує важливості, які записуються у файл, що використовується для зменшення дисперсії в іншому Serpent-обчисленні або в наступній зовнішній ітерації в GVR-послідовності.

У коді Serpent доступні декілька методів зменшення дисперсії, наведені нижче.

1. Зменшення дисперсії, простий підхід (variance reduction, simple approach): розділяє обчислення на

дві частини. Перший цикл генерує сітку важливостей, а другий видає кінцевий результат, застосовуючи техніку вагового вікна.

2. Глобальне зменшення дисперсії, фіксована сітка (global variance reduction, fixed mesh): створює сітку вагового вікна, яка рівномірно заповнює всю геометрію. Розрахунок здійснюється за ітераціями. Кожен цикл дозволяє частинкам виходити за межі області, визначеної для сітки вагового вікна, і зібрані нові дані використовуються, щоб розширити сітку глибше в геометрію.

3. Глобальне зменшення дисперсії, адаптивна сітка (global variance reduction, adaptive mesh): використовує три прогони. Перший прогон — ітерація глобального зменшення дисперсії, поки геометрія не буде достатньо заповнена. Другий прогон — генерація оптимальної сітки вагового вікна. Третій прогон — остаточне моделювання переносу з використанням оптимальної сітки.

У цій статті досліджено два методи застосування зменшення дисперсії: зменшення дисперсії для дискретного детектора та глобальне зменшення дисперсії для всієї Монте-Карло моделі.

Для перевірки та дослідження функції зменшення дисперсії, за допомогою нейтронно-фізичного Монте-Карло коду Serpent версії 2.1.31, була створена спрощена 2D-модель контейнера зберігання HI-STORM 190. Основні геометричні характеристики контейнера HI-STORM 190 [10]: зовнішній діаметр — 355,1 см, внутрішній діаметр (без урахування направляючих БЦК) — 207,5 см.

Контейнер HI-STORM 190 — це система зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), яка складається з контейнера, зробленого зі сталі та бетону. У центрі контейнера HI-STORM 190 розташований багатоцільовий контейнер (БЦК), завантажений 31 тепловидільною збіркою альтернативної конструкції (ТВЗА) ВВЕР-1000. Центральна паливна збірка розміщена в центрі контейнера. Крок розміщення паливних збірок у БЦК — 25,32 см. Для спрощення як ВЯП використано діоксид урану природного збагачення густиною 10,22 г/см³, що є джерелом нейтронного випромінювання. Спектр джерела нейтронного випромінювання з розбиттям по енергетичних групах, який застосовували в цій моделі, наведено нижче. Для вимірювання потоку нейтронів було змодельовано чотири циліндричні dtl (оцінка довжини треків) детектори, розміщені перед шаром бетону, у самому бетоні та два детектори за бетоном (рис. 1).

Спектр джерела нейтронного випромінювання [10]

Верхня межа енергетичного біна, МеВ	Вага енергетичного біна, нейтрон/сек
$1,00 \cdot 10^{-1}$	0
$4,00 \cdot 10^{-1}$	$7,39020 \cdot 10^{-2}$
$9,00 \cdot 10^{-1}$	$1,60473 \cdot 10^{-1}$
1,40	$1,60473 \cdot 10^{-1}$
1,85	$1,28378 \cdot 10^{-1}$
3,00	$2,39302 \cdot 10^{-1}$
6,43	$2,16779 \cdot 10^{-1}$
20,00	$2,06926 \cdot 10^{-2}$

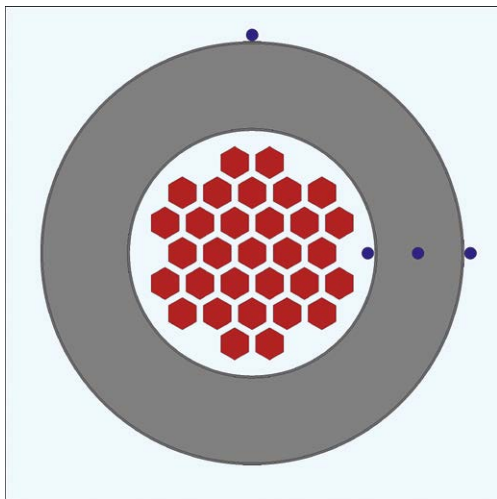


Рис. 1. Візуалізація Serpent-моделі контейнера NI-STORM 190 (поперечний переріз), шестигранники — ТВЗА, кола — детектори

Усі представлені розрахунки було виконано на розрахунковому комп'ютері з процесором Intel(R) Core(TM) i5-8600K CPU @ 3.60GHz та оперативною пам'яттю 32 Gb. На першому етапі було проведено розрахунки перенесення нейтронів для цієї моделі без застосування методу зменшення дисперсії для отримання базових результатів для порівняння. У розрахунках було промодельовано 10, 50, 100 і 500 млн нейтронних історій у режимі зовнішнього джерела, розподілених на 200 нейтронних пакетів (batches). В усіх детекторах розраховувався потік нейтронів по всьому спектрі енергій, без поділу на енергетичні біни (табл. 1).

У рамках дослідження зменшення дисперсії для дискретного детектора та глобального зменшення дисперсії для всієї Монте-Карло моделі було застосовано декартову та циліндричну сітки. У всіх розрахунках із застосуванням методу зменшення диспер-

Таблиця 1. Результати розрахунків без застосування зменшення дисперсії

Назва детектора	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, $n/(cm^2 \cdot c)$	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
d3	4,44	$2,17892 \cdot 10^3$	0,36975	1,65
d3	23,23	$1,96915 \cdot 10^3$	0,16568	1,57
d3	46,31	$2,28474 \cdot 10^3$	0,11357	1,67
d3	230,51	$1,97083 \cdot 10^3$	0,0577	1,30

сії було промодельовано 10 млн нейтронних історій у режимі зовнішнього джерела, розподілених на 200 нейтронних пакетів. У першому випадку наша модель була покрита декартовою сіткою. Сітка охоплювала всю змодельовану геометрію. Параметри сітки змінювались від $5 \times 5 \times 1$ (5 частин по осі X, 5 частин по осі Y, 1 частина по осі Z) до $151 \times 151 \times 1$ з розміром зерна від 82,8 до 2,74 см. Візуалізацію покриття декартовою сіткою показано на рис. 2. Дослідження різного розбиття сітки проводилося з метою аналізу ефективності використання технології зменшення дисперсії від розміру зерна в декартовій та циліндричній сітках. Ефект зменшення дисперсії аналізувався за значеннями потоку нейтронів у детекторі, розміщеному за бетоном у напрямку осі X. Результати в усіх інших детекторах використовувались як верифікаційні інструменти. Результати розрахунків у детекторі за бетоном з використанням функції зменшення дисперсії при різних характеристиках декартової сітки наведено в табл. 2.

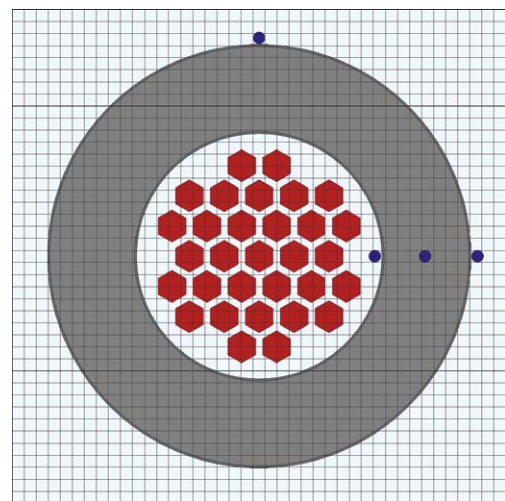


Рис. 2. Serpent-візуалізація покриття декартовою сіткою при розбитті $41 \times 41 \times 1$ і розмірі зерна 10,10 см

Таблиця 2. Результати моделювання з використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик декартової сітки

Розмір сітки	Розмір зерна, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² · с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
5×5×1	82,80	5,30	2,16069 · 10 ³	0,06333	47,04
11×11×1	37,64	6,32	2,20360 · 10 ³	0,02293	300,94
21×21×1	19,71	8,16	2,12109 · 10 ³	0,0101	1201,34
31×31×1	13,35	10,35	2,16833 · 10 ³	0,00814	1458,18
41×41×1	10,10	10,58	2,14426 · 10 ³	0,00707	1890,93
51×51×1	8,12	11,57	2,13484 · 10 ³	0,00781	1416,98
61×61×1	6,79	13,07	2,12669 · 10 ³	0,00702	1552,57
71×71×1	5,83	13,47	2,11765 · 10 ³	0,00845	1039,73
81×81×1	5,11	13,59	2,13548 · 10 ³	0,00688	1554,55
91×91×1	4,55	14,27	2,13841 · 10 ³	0,00774	1169,75
101×101×1	4,10	14,50	2,11205 · 10 ³	0,00883	884,53
111×111×1	3,73	15,51	2,15980 · 10 ³	0,01612	248,12
121×121×1	3,42	15,15	2,14897 · 10 ³	0,00793	1049,64
131×131×1	3,16	16,45	2,11027 · 10 ³	0,00819	906,29
141×141×1	2,94	16,49	2,12975 · 10 ³	0,00976	636,62
151×151×1	2,74	16,01	2,10276 · 10 ³	0,00786	1011,03

Для кількісної оцінки оптимального розміру сітки обчислювальні показники було оцінено за допомогою показника якості (Figure of merit — FOM) [11]

$$FOM = 1/\sigma^2 T, \quad (4)$$

де σ — відносна статистична похибка; T — час розрахунку.

Як видно з табл. 2, показник якості залежить від розміру зерна в декартовій сітці. Також видно, що за великих розмірів зерна показник якості досить низький, але при зменшенні розміру зерна він суттєво збільшується і досягає піка за розміру зерна приблизно 10 см. Проте подальше зменшення розміру зерна погіршує показник якості. З табл. 2 видно, що можна знайти рекомендований розмір зерна в декартовій сітці для розглянутої геометрії контейнерів HI-STORM 190.

В інших двох випадках модель геометрії була покрита циліндричною сіткою. У першому область розбивалася тільки в радіальному напрямку з рівномірним кроком по радіусу. Кількість радіальних комірок становила від 10 до 150 з шириною від 29,28 до 1,95 см. У другому випадку розбиття проводилося і в радіальному, і в азимутальному напрямках з рівномірним кроком. Кількість проміжків по радіусу не змінювалась і становила 50, а кількість проміжків по куту — від 2 до

Таблиця 3. Результати моделювання із використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик циліндричної сітки (зміна в радіальному напрямку)

Розбиття в радіальному напрямку	Ширина радіального шару, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² · с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
10	29,28	6,33	2,22714 · 10 ³	0,03523	127,28
20	14,64	9,18	2,13526 · 10 ³	0,0281	137,96
30	9,76	10,21	2,16672 · 10 ³	0,02112	219,58
40	7,32	11,10	2,11898 · 10 ³	0,02394	157,19
50	5,86	11,39	2,16547 · 10 ³	0,01905	241,93
60	4,88	11,52	2,05014 · 10 ³	0,02019	212,95
70	4,18	13,24	2,14254 · 10 ³	0,02225	152,56
80	3,66	13,34	2,15157 · 10 ³	0,02193	155,87
90	3,25	13,59	2,20381 · 10 ³	0,02095	167,65
100	2,93	13,56	1,99808 · 10 ³	0,02304	138,92
110	2,66	14,09	2,24136 · 10 ³	0,03046	76,49
120	2,44	14,25	2,08228 · 10 ³	0,02409	120,92
130	2,25	14,20	2,20146 · 10 ³	0,02265	137,27
140	2,09	14,32	2,10030 · 10 ³	0,02244	138,68
150	1,95	15,45	2,16908 · 10 ³	0,02272	125,39

10. Значення важливостей розраховувалися відносно одного детектора, розміщеного за бетоном. Візуалізацію покриття циліндричною сіткою показано на рис. 3. Результати розрахунків у детекторі за бетоном з використанням функції зменшення дисперсії за різних характеристик циліндричної сітки наведено в табл. 3 і 4.

Аналізуючи інформацію в табл. 3 і 4, можна дійти таких висновків: 1) циліндрична сітка не така ефективна

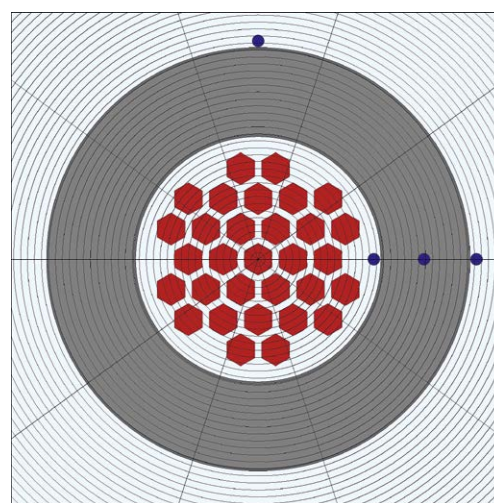


Рис. 3. Serpent-візуалізація покриття циліндричною сіткою при розбитті на 50 частин у радіальному напрямку та на 10 частин в азимутальному напрямку

Таблиця 4. Результати моделювання з використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик циліндричної сітки (змiна в азимутальному напрямку)

Ширина радіального шару, см	Кількість частин в азимутальному напрямку	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² ·с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
5,86	2	15,53	2,18513 · 10 ³	0,01721	217,40
5,86	3	12,12	2,17737 · 10 ³	0,01671	295,49
5,86	4	11,52	2,14197 · 10 ³	0,01818	262,64
5,86	5	11,41	2,13662 · 10 ³	0,01604	340,65
5,86	6	12,09	2,15814 · 10 ³	0,01241	537,07
5,86	7	12,19	2,16031 · 10 ³	0,01309	478,76
5,86	8	12,07	2,14235 · 10 ³	0,0133	468,37
5,86	9	12,17	2,16845 · 10 ³	0,01172	598,21
5,86	10	11,34	2,13688 · 10 ³	0,01187	625,87

з точки зору показника якості порівняно з декартовою сіткою; 2) для циліндричної сітки також можна знайти рекомендований розмір зерна, як і для декартової у випадку розглянутої геометрії контейнерів HI-STORM 190; 3) збільшення розбиття циліндричної сітки на азимутальні частини веде до збільшення показника якості.

Також було проведено дослідження функції зменшення дисперсії у випадку, коли важливості оцінюються для кількох детекторів. Для цього розрахунок було встановлено ще один детектор за межами біологічного захисту на тій самій відстані по радіусу від центра геометрії, що й детектор по осі X, але перевернутий відносно нього на 90 град (детектор на осі Y), та проведено розрахунки для двох сіток (декартової та циліндричної). Значення важливості розраховувалися відносно двох детекторів, розміщених за бетоном. Результати розрахунків у детекторі за бетоном з використанням функції зменшення дисперсії за різних характеристик декартової сітки наведено в табл. 5–8.

Як видно з табл. 5 і 6, в умовах декартової сітки використання функції зменшення дисперсії для двох детекторів, розміщених у різних частинах геометрії, призводить до зменшення показника якості приблизно вдвічі. Хоча для циліндричної сітки (без азимутального розбиття) у випадку двох детекторів показник якості зменшується несуттєво. Це пояснюється тим, що важливості у циліндричній сітці розраховуються по однакових комірках у радіальному напрямку як для детектора, направлено по осі X, так і для детектора, направлено по осі Y.

Таблиця 5. Результати моделювання з використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик декартової сітки (два детектори), детектор по осі X

Розмір сітки	Розмір зерна, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² ·с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
5×5×1	82,80	5,46	2,16782 · 10 ³	0,05482	60,94
11×11×1	37,64	6,39	2,19545 · 10 ³	0,02291	298,16
21×21×1	19,71	8,21	2,13319 · 10 ³	0,01539	514,26
31×31×1	13,35	9,52	2,18042 · 10 ³	0,01356	571,27
41×41×1	10,10	10,41	2,12058 · 10 ³	0,01261	604,11
51×51×1	8,12	11,55	2,07513 · 10 ³	0,01231	571,35
61×61×1	6,79	13,14	2,11600 · 10 ³	0,01107	621,03
71×71×1	5,83	13,11	2,12644 · 10 ³	0,01218	514,17
81×8×11	5,11	13,16	2,15114 · 10 ³	0,01205	523,32
91×91×1	4,55	14,01	2,10899 · 10 ³	0,0097	758,61
101×101×1	4,10	15,06	2,13128 · 10 ³	0,01391	343,18
111×111×1	3,73	15,02	2,12160 · 10 ³	0,01091	559,35
121×121×1	3,42	15,16	2,12490 · 10 ³	0,01059	588,18
131×131×1	3,16	15,33	2,10848 · 10 ³	0,02194	135,51
141×141×1	2,94	15,52	2,09880 · 10 ³	0,01237	421,08
151×151×1	2,74	16,41	2,08261 · 10 ³	0,01864	175,39

Таблиця 6. Результати моделювання з використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик декартової сітки (два детектори), детектор по осі Y

Розмір сітки	Розмір зерна, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² ·с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
5×5×1	82,80	5,46	2,12274 · 10 ³	0,05755	55,30
11×11×1	37,64	6,39	2,14897 · 10 ³	0,01751	510,42
21×21×1	19,71	8,21	2,11587 · 10 ³	0,01267	758,76
31×31×1	13,35	9,52	2,07576 · 10 ³	0,01072	914,06
41×41×1	10,10	10,41	2,09613 · 10 ³	0,01007	947,31
51×51×1	8,12	11,55	2,12631 · 10 ³	0,01339	482,90
61×61×1	6,79	13,14	2,20143 · 10 ³	0,02677	106,20
71×71×1	5,83	13,11	2,09091 · 10 ³	0,01005	755,21
81×81×1	5,11	13,51	2,09384 · 10 ³	0,0091	893,84
91×91×1	4,55	13,45	1,94997 · 10 ³	0,01128	584,33
101×101×1	4,10	15,06	2,09779 · 10 ³	0,01229	439,61
111×111×1	3,73	15,02	2,13238 · 10 ³	0,01141	511,40
121×121×1	3,42	15,16	2,09537 · 10 ³	0,01332	371,79
131×131×1	3,16	15,33	2,09747 · 10 ³	0,01835	193,73
141×141×1	2,94	15,52	2,08413 · 10 ³	0,013	381,26
151×151×1	2,74	16,41	2,04914 · 10 ³	0,01474	280,48

Таблиця 7. Результати моделювання з використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик циліндричної сітки (два детектори), детектор по осі X

Розмір сітки	Розмір зерна, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² · с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
10	29,28	6,41	2,10301 · 10 ³	0,03918	101,63
20	14,64	9,34	2,13802 · 10 ³	0,0265	152,46
30	9,76	10,38	2,08226 · 10 ³	0,02275	186,14
40	7,32	11,30	2,07780 · 10 ³	0,0205	210,58
50	5,86	11,58	2,16145 · 10 ³	0,02053	204,89
60	4,88	12,25	2,14579 · 10 ³	0,02115	182,49
70	4,18	13,47	2,10721 · 10 ³	0,02217	151,04
80	3,66	14,05	2,16349 · 10 ³	0,02274	137,64
90	3,25	14,13	2,10403 · 10 ³	0,02181	148,78
100	2,93	14,15	2,04266 · 10 ³	0,02402	122,49
110	2,66	14,38	2,13293 · 10 ³	0,02457	115,19
120	2,44	14,53	2,10696 · 10 ³	0,02467	113,08
130	2,25	15,00	2,20627 · 10 ³	0,0215	144,22
140	2,09	14,57	2,09792 · 10 ³	0,02483	111,32
150	1,95	16,24	2,2042 · 10 ³	0,02162	131,74

Таблиця 8. Результати моделювання з використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик циліндричної сітки (два детектори), детектор по осі Y

Розмір сітки	Розмір зерна, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² · с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
10	29,28	6,41	2,03069 · 10 ³	0,04001	97,46
20	14,64	9,34	2,15127 · 10 ³	0,02386	188,07
30	9,76	10,38	2,15929 · 10 ³	0,0222	195,48
40	7,32	11,30	2,07767 · 10 ³	0,02123	196,35
50	5,86	11,58	2,07118 · 10 ³	0,02034	208,73
60	4,88	12,25	2,15687 · 10 ³	0,02134	179,26
70	4,18	13,47	2,09919 · 10 ³	0,02145	161,35
80	3,66	14,05	2,10938 · 10 ³	0,02165	151,85
90	3,25	14,13	2,10237 · 10 ³	0,02829	88,43
100	2,93	14,15	2,07334 · 10 ³	0,02311	132,33
110	2,66	14,38	2,08722 · 10 ³	0,02481	112,98
120	2,44	14,53	2,13599 · 10 ³	0,02379	121,60
130	2,25	15,00	2,07143 · 10 ³	0,02254	131,22
140	2,09	14,57	2,11307 · 10 ³	0,02467	112,77
150	1,95	16,24	2,22104 · 10 ³	0,02243	122,39

Таблиця 9. Результати моделювання із використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик декартової сітки для глобального зменшення дисперсії

Розмір сітки	Розмір зерна, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² · с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
5×5×1	82,80	17,15	2,2264 · 10 ³	0,13403	3,25
11×11×1	37,64	20,49	2,1994 · 10 ³	0,03706	35,53
21×21×1	19,71	24,11	2,0811 · 10 ³	0,03066	44,12
31×31×1	13,35	25,07	2,1303 · 10 ³	0,02584	59,74
41×41×1	10,10	29,04	2,2021 · 10 ³	0,02326	63,65
51×51×1	8,12	28,45	2,0909 · 10 ³	0,02478	57,24
61×61×1	6,79	29,32	2,2179 · 10 ³	0,02541	52,82
71×71×1	5,83	30,26	2,1343 · 10 ³	0,02656	46,85
81×81×1	5,11	31,43	2,1421 · 10 ³	0,02595	47,25
91×91×1	4,55	32,33	2,1040 · 10 ³	0,02551	47,53
101×101×1	4,10	32,33	2,1775 · 10 ³	0,02633	44,62
111×111×1	3,73	32,55	2,0816 · 10 ³	0,02541	47,58
121×121×1	3,42	35,09	2,0229 · 10 ³	0,02647	40,67
131×131×1	3,16	36,01	2,0693 · 10 ³	0,02674	38,84
141×141×1	2,94	35,26	2,1444 · 10 ³	0,02466	46,64
151×151×1	2,74	37,14	2,1140 · 10 ³	0,02732	36,07

Таблиця 10. Результати моделювання з використанням технології зменшення дисперсії за різних характеристик циліндричної сітки для глобального зменшення дисперсії

Розмір сітки	Розмір зерна, см	Час розрахунку, хв	Густина потоку нейтронів, н/(см ² · с)	Відносна статистична похибка	Показник якості (FOM)
10	29,28	17,32	2,03093 · 10 ³	0,04308	31,11
20	14,64	22,35	2,14412 · 10 ³	0,02722	60,39
30	9,76	24,22	2,13918 · 10 ³	0,02555	63,25
40	7,32	25,30	2,15003 · 10 ³	0,02506	62,94
50	5,86	26,19	2,05239 · 10 ³	0,02261	74,69
60	4,88	27,15	2,11421 · 10 ³	0,02719	49,82
70	4,18	30,48	2,15244 · 10 ³	0,02334	60,23
80	3,66	30,56	2,16032 · 10 ³	0,02595	48,59
90	3,25	31,03	2,08206 · 10 ³	0,02705	44,04
10	2,93	31,22	2,05985 · 10 ³	0,02557	48,99
110	2,66	31,48	2,15240 · 10 ³	0,02572	48,02
120	2,44	32,18	2,12868 · 10 ³	0,0249	50,12
130	2,25	32,40	2,07002 · 10 ³	0,02578	46,44
140	2,09	33,12	1,99806 · 10 ³	0,02959	34,48
150	1,95	35,51	2,14657 · 10 ³	0,02538	43,72

Також було проведено дослідження функції зменшення дисперсії у випадку режиму глобального зменшення дисперсії в усьому об'ємі розглянутої моделі. Значення важливості розраховувалися відносно детектора, який був розміщений за бетоном, у напрямку осі X. Результати розрахунків у детекторі за бетоном з використанням функції зменшення дисперсії за різних характеристик декартової та циліндричної сіток для глобального зменшення дисперсії наведено в табл. 9 і 10.

Зрозуміло, що для випадку глобального зменшення дисперсії показник якості суттєво нижчий, ніж для випадку одного детектора, але при цьому ми можемо розставляти детектори по всій геометрії системи. Особливо це корисно у випадку розрахунку несиметричних геометрій систем біологічного захисту.

Висновки

Досліджено та продемонстровано можливості коду Serpent з використанням функції зменшення дисперсії для розрахунку перенесення нейтронів на прикладі простої геометрії контейнера HI-STORM 190. Аналізуючи показник якості для цих розрахунків, можна сформулювати такі висновки:

циліндрична сітка не така ефективна з точки зору показника якості в порівнянні з декартовою сіткою;

як для циліндричної, так і для декартової сіток можна знайти рекомендований розмір зерна;

використання азимутального розбиття циліндричної сітки разом із радіальним розбиттям веде до збільшення показника якості;

застосування глобального зменшення дисперсії корисне у випадку несиметричних геометрій біологічного захисту, при цьому показник якості зменшується.

Отже, результати досліджень показують, що метод зменшення дисперсії, реалізований у коді Serpent, у десятки разів покращує ефективність розрахунку біологічного захисту порівняно з моделюванням без застосування цього методу та може бути потужним інструментом для розрахунку біологічного захисту для великих розмірів.

Список використаної літератури

1. Leppänen J. Response Matrix Method-Based Importance Solver and Variance Reduction Scheme in the Serpent 2 Monte Carlo Code / J. Leppänen // Nuclear Technology. — 2019. — Vol. 205, № 11. — P. 1416–1432.
2. A new global variance reduction technique based on pseudo flux method / T. Shi, H. Huang, Y. Qiu [et al.] // Nuclear Engineering and Design. — 2017. — Vol. 324. — P. 18–26.

3. Lux I. Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations / I. Lux, L. Koblinger. — Boca Raton : CRC Press, 1991. — 529 p.
4. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013 / J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen [et al.] // Annals of Nuclear Energy. — 2015. — Vol. 82. — P. 142–150.
5. Leppänen J. Development of an unstructured mesh based geometry model in the Serpent 2 Monte Carlo code / J. Leppänen, M. Aufiero // Proceedings of the Int. Conf. on Physics of Reactors, PHYSOR 2014 (Kyoto, Japan, 2015).
6. Leppänen J. CAD-based geometry type in serpent 2-application in fusion neutronics / J. Leppänen // Mathematics and Computations, Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo Int. Conf. (Nashville, U. S., Curran Associates Inc). — 2015. — P. 1635–1646.
7. Kaltiaisenaho T. Expanding the Use of Serpent 2 to Fusion Applications: Shut-down Dose Rate Calculations / T. Kaltiaisenaho, J. Leppänen // International Conference on the Physics of Reactors, PHYSOR 2016 (Sun Valley, United States, 2016).
8. Development of a coupled neutron/photon transport mode in the Serpent 2 Monte Carlo code / J. Leppänen, T. Kaltiaisenaho, V. Valtavirta, M. Metsälä // Int. Conf. on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering, M&C 2017 (Jeju, Republic of Korea, 2017).
9. Leppänen J. Development of a variance reduction scheme in the serpent 2 Monte Carlo code / J. Leppänen, T. Viitanen, O. Hyvönen // Int. Conf. on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering, M&C 2017 (Jeju, Republic of Korea, 2017).
10. Актуализированный предварительный отчет по анализу безопасности ЦХОЯТ, ГП «ГНИЦ СКАР», Киев, Украина, 2018.
11. Leppänen J. On the use of delta-tracking and the collision flux estimator in the Serpent 2 Monte Carlo particle transport code / J. Leppänen // Annals of Nuclear Energy. — 2017. — Vol. 105. — P. 161–167.

M. I. Holiuk, O. M. Khotiaintseva, V. M. Khotiaintsev, A. V. Nosovskiy, V. I. Gulik

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine

The Optimization of Calculation Time and Statistical Error for the Radiation Shielding Properties Simulation of Containers for Storage of Spent Nuclear Fuel

The radiation protection is an important issue in the operation of nuclear power plants and artificial radioactive sources, which include spent nuclear fuel storage facilities. The Monte-Carlo codes are the effective instruments for calculation of radiation shielding properties and radiation field characteristics for complex geometries. However, achieving a satisfactory statistical error of the results in modeling the passage of neutrons and photons through biological protection may require excessively long calculation time. To solve this problem, Monte-Carlo codes use methods to reduce the variance to direct particles to regions with detectors to improve statistical accuracy. Our paper presents the application of the variance reduction function based on weight windows in the Monte-Carlo Serpent code, the function is investigated on the example of a simplified 2D model of the spent nuclear fuel storage container HI-STORM 190. The simple approach option of variance reduction with fixed cartesian and cylindrical meshes was investigated for different mesh nodes and for different dimensions of nodes. Also, global variance reduction option with fixed cartesian and cylindrical meshes was analyzed for case of achieving satisfactory results for the entire simulated volume. For a qualitative assessment of the variance reduction function, the indicator — figure of merit (FOM) used in our paper which proposed by the developers of the Serpent Monte-Carlo code. It is shown that the use of the variance reduction function leads to a significant decrease of statistical error and decrease of the calculation time, and therefore can be useful for biological protection calculations. As conclusions we can note that: the cylindrical mesh is not as effective in terms of FOM compared to Cartesian mesh; for both cylindrical and Cartesian meshes it is possible to find the recommended grain (node) size; the use of azimuthal partition of the cylindrical mesh together with radial partition leads to an increase in FOM; the application of global variance reduction is useful in the case of asymmetric biological protection geometries, while the FOM decreases.

Keywords: Monte Carlo Serpent code, container HI-STORM 190, radiation protection, variance reduction, global variance reduction, figure of merit.

References

1. Leppänen J. (2019). Response matrix method-based importance solver and variance reduction scheme in the Serpent 2 Monte Carlo code. *Nuclear Technology*, vol. 205, no. 11, pp. 1416–1432.
2. Shi T., Huang H. Qiu Y., Li Z., Qian D. (2017). A new global variance reduction technique based on pseudo flux method. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 324, pp. 18–26.
3. Lux I., Koblinger L. (1991). *Monte Carlo particle transport methods: neutron and photon calculations*. Boca Raton: CRC Press, 529 p. doi: 10.1201/9781351074834.
4. Leppänen J., Viitanen T., Hyvönen O. (2017). Development of a variance reduction scheme in the Serpent 2 Monte Carlo code. Proceedings of the *Int. Conf. on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering, M&C2017 (Jeju, Republic of Korea, April 16–20, 2017)*.
5. Leppänen J., Aufiero M. (2015). Development of an unstructured mesh based geometry model in the Serpent 2 Monte Carlo code. Proceedings of the *Int. Conf. on Physics of Reactors, PHYSOR2014 (Kyoto, Japan, September 28 — October 3, 2014)*, 1101586.
6. Leppänen J. (2015). CAD-based geometry type in Serpent 2 — Application in fusion neutronics. Proceedings of the *Mathematics and Computations, Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo Int. Conf. (Nashville, U. S., April 19–23, 2015)*. Curran Associates Inc., pp. 1635–1646.
7. Kaltiaisenaho T., Leppänen J. (2016). Expanding the use of Serpent 2 to fusion applications: Shut-down dose rate calculations. Proceedings of the *Int. Conf. on the Physics of Reactors, PHYSOR2016 (Sun Valley, U. S., May 1–5, 2016)*.
8. Leppänen J., Kaltiaisenaho T., Valtavirta V., Metsälä M. (2017). Development of a coupled neutron/photon transport mode in the Serpent 2 Monte Carlo code. Proceedings of the *Int. Conf. on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering, M&C2017 (Jeju, Republic of Korea, April 16–20, 2017)*.
9. Leppänen J., Viitanen T., Hyvönen O. (2017). Development of a variance reduction scheme in the serpent 2 Monte Carlo code. Proceedings of the *International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering, M&C2017 (Jeju, Republic of Korea, April 16–20, 2017)*.
10. *Updated preliminary report on the safety analysis of CSFSF*. Kyiv: SE “State Scientific and Engineering Center for Control Systems and Emergency Response”, 2018. (in Russ.)
11. Leppänen J. (2017). On the use of delta-tracking and the collision flux estimator in the Serpent 2 Monte Carlo particle transport code. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 105, pp. 161–167.

Надійшла 30.06.2021

Received 30.06.2021