

Застосування Монте-Карло коду Serpent для моделювання системи неруйнівного контролю на основі зворотно розсіяного рентгенівського випромінювання

Божук^f А. М., ORCID [0000-0002-1488-2767](https://orcid.org/0000-0002-1488-2767)

Михайлов^s С. Р., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-4314-785X](https://orcid.org/0000-0002-4314-785X)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Трофименко О. Р., ORCID [0000-0002-7704-0911](https://orcid.org/0000-0002-7704-0911)

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, www.isppp.kiev.ua

Київ, Україна

Анотація—Створено модель системи неруйнівного контролю на основі зворотно розсіяного рентгенівського випромінювання в середовищі Serpent. Проведено моделювання експерименту для декількох комбінацій параметрів системи, зокрема при зміні кута просвічування та відстані між досліджуваним об'єктом та детектором, виконано якісний та кількісний аналіз результатів.

Ключові слова — Serpent; неруйнівний контроль; рентгенівське випромінювання; зворотно розсіяне випромінювання.

I. ВСТУП

Аналіз зображень, отриманих при використанні рентгенівського випромінювання, широко застосовується в медицині [1]–[3], в системах неруйнівного контролю [4], [5] та в системах безпеки [6]–[8]. Найчастіше в таких системах детектор випромінювання знаходиться поза досліджуваним об'єктом, утворюючи таким чином ланцюжок: джерело випромінювання — досліджуваний об'єкт – детектор. Недоліком подібних систем є неможливість їх використання для просвічування об'єктів, місце знаходження яких не дозволяє розташувати детектор випромінювання безпосередньо позаду об'єкту. Наприклад, для знаходження дефектів у промислових трубопроводах, зварювальних швах, зовнішніх стінах спеціальних будов.

Актуальність даного дослідження полягає у створенні принципово нової конфігурації складових систем, за якої як джерело випромінювання, так і детектор знаходяться перед досліджуваним об'єктом, утворюючи таким чином ланцюжок: джерело випромінювання – детектор – досліджуваний об'єкт.

Зворотно розсіяне випромінювання стало основою для побудови моделі томографії трубопроводів з використанням гамма фотонів [9], а також для

пошуку органічних речовин та вибухівок [10], [11]. Проте використання рентгенівського випромінювання в системах на зворотно розсіяному випромінюванні слабо вивчене.

Метою даного дослідження є розробка комп'ютерної моделі системи на основі зворотно розсіяного рентгенівського випромінювання в середовищі Serpent. Дані про існування раніше створених подібних моделей в середовищі Serpent відсутні. Для перевірки моделі проведено аналіз впливу зміни геометричних параметрів компонентів, зокрема кута падіння випромінювання та відстані між досліджуваним об'єктом і детектором розсіяного випромінювання.

II. МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження процесу розсіювання високоенергетичних фотонів від об'єктів із різних матеріалів та різної геометричних параметрів, було застосовано розрахунковий спектральний Монте-Карло код Serpent [12]. Serpent — це багатоцільовий тривимірний безперервний енергетичний код частинок Монте-Карло, розроблений у Центрі технічних досліджень VTT Фінляндії.

Під час взаємодії високоенергетичних фотонів (рентгенівського випромінювання) з твердим матеріалом відбуваються декілька складних фізичних про-



цесів, основним з яких є комптонівське розсіювання [13].

Комптонівське розсіювання відноситься до некогерентного розсіювання фотонів на заряджених частинках, зазвичай на електронах. При комптонівському розсіюванні фотон змінює напрямок руху та енергію. Енергія розсіяного фотону жорстко пов'язана з падаючою енергією фотона E і кутом розсіювання θ і виражається як [14]:

$$E_s = \frac{E}{1 + \alpha \cdot (1 - \cos \theta)}, \quad (1)$$

де E_s – енергія розсіяного фотона; $\alpha = \frac{h\nu_1}{m_0c^2}$ – відношення енергії падаючого фотона до енергії маси спокою електрона; h – стала Планка; ν_1 – початкова частота випромінювання; m_0 – маса спокою електрона; c – швидкість світла.

Послаблення інтенсивності рентгенівського випромінювання при проходженні через матеріал довжиною x описується законом Бугера-Ламберта-Бера [10]:

$$I = I_0 \exp(-\mu\rho x), \quad (2)$$

де I_0 – початкова інтенсивність, ρ – густина матеріалу, μ – масовий коефіцієнт послаблення матеріалу, що залежить від атомного порядку матеріалу та енергії рентгенівського випромінювання.

Як видно з (1), енергія розсіяного випромінювання залежить від кута розсіювання.

В даному дослідженні за допомогою вищезгаданого Монте-Карло коду Serpent розроблено модель для знаходження дефекту при падінні первинного

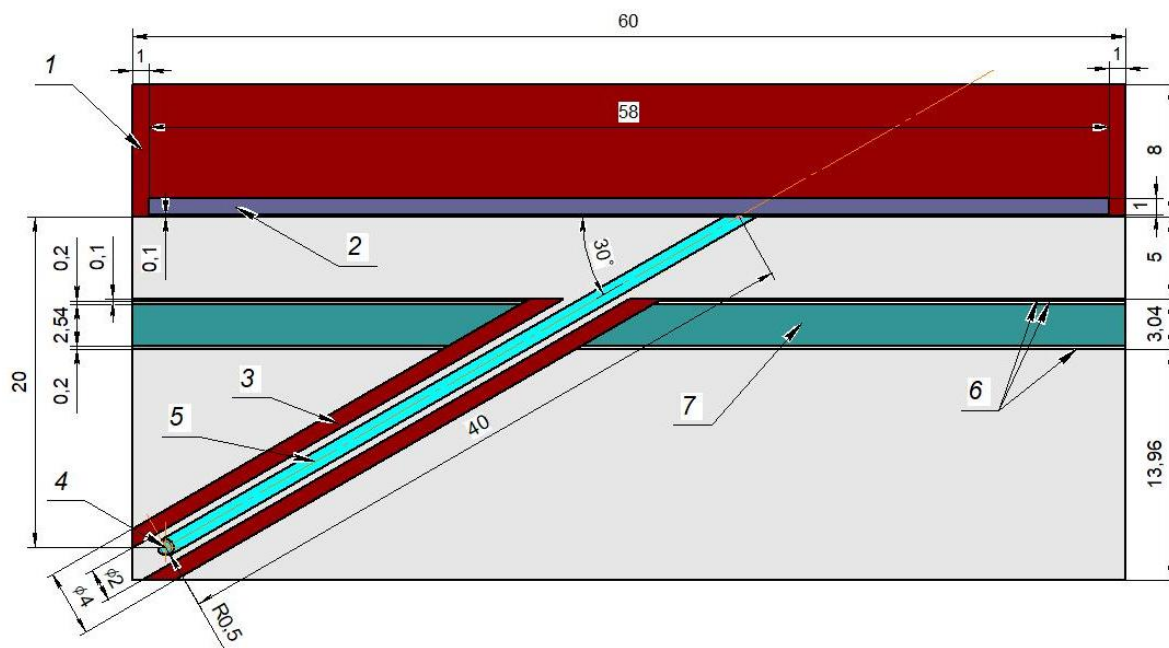
пучка випромінювання під кутом 30° та 45° до досліджуваного об'єкту (кут розсіювання θ становить 120° та 135° відповідно [14]).

III. ОПИС МОДЕЛІ

На Рис. 1 зображено схему просвічування використану в даному дослідженні.

Основними складовими областями моделі, представленої на Рис. 1, є:

- 1) товстостінна суцільна пластина зі сталі SA36 [15], яка просвічується пучком фотонів;
- 2) тонкостінна пластина зі свинцю, що розміщена у об'ємі сталеві пластина на глибині 0,1 [см] під поверхнею;
- 3) направляючий циліндричний канал зі сталі SA36 від джерела випромінювання до області над поверхнею сталеві пластина;
- 4) сферичне джерело рентгенівського випромінювання, з якого формується направлений пучок фотонів з енергією 100 [кеВ] та радіусом 0,5 [см];
- 5) направлений пучок фотонів з енергією 100 [кеВ];
- 6) екрани з оксиду алюмінію (Al_2O_3) на поверхнях пластина детектування та алюмінієве (Al) покриття на екрані Al_2O_3 зі сторони сталеві пластина;
- 7) пластина детектування, яка складається з суцільного сцинтиляційного кристалу йодиду натрію NaI.



Таблиця 1 Густина матеріалів моделі

№ п/п	Матеріал та позначення у моделі	Область	Густина, [г/мм ³]
1	Сталь SA36	Товстостінна пластина, направляючий циліндричний канал	$7,85 \cdot 10^3$
2	Свинець Pb	Тонкостінна пластина	$1,13415 \cdot 10^2$
3	Повітря	Об'єм джерела випромінювання, навколишнє середовище	$1,275 \cdot 10^{-6}$
4	Йодид натрію NaI	Пластина детектування (сцинтиляційний кристал)	$3,67 \cdot 10^3$
5	Алюміній Al	Алюмінієве покриття на екрані зі сторони сталеві пластини	$2,6989 \cdot 10^3$
6	Оксид алюмінію Al ₂ O ₃	Екрани на поверхнях пластини детектування	$3,99 \cdot 10^3$

Таблиця 2 Опис проведених у роботі розрахунків

№ п/п	Умовне позначення	Особливості розрахункової моделі		
		Кут розсіювання пучка фотонного випромінювання	Відстань від області детектування до поверхні сталеві пластини, [см]	Наявність свинцевої пластини
1	C1-1	135°	1	Ні
2	C1-2	135°	1	Так
3	C2-1	120°	1	Ні
4	C2-2	120°	1	Так
5	C3-1	120°	5	Ні
6	C3-2	120°	5	Так

Густина задіяних у моделі матеріалів представлені у табл. Таблиця 1.

Передбачена можливість змінювати будь-які геометричні характеристики та матеріали складових моделі, що також можливо завдяки сутності підходів моделювання методом Монте-Карло.

Було проведено розрахунки для шістьох випадків, представлених у табл. Таблиця 2.

Одним з завдань було перевірити можливість застосування нового Монте-Карло коду Serpent для моделювання представленої системи.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ

На Рис. 2 представлена візуалізація розрахункової моделі кодом Serpent, а саме просвічування пучком фотонів товстостінної сталеві пластини для випадку C3-2. Ліворуч зображено схематичний вид моделі до опромінення, праворуч – після. Градація кольорів від синього до червоного відображає відносну величину густини потоку фотонів у об'ємі моделі [$1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$].

Зафіксованими результатами у даній роботі є розподіл густини потоку фотонів у об'ємі області детектування, яка задана таким чином, щоб повністю охоплювати матеріал NaI. Однак варто відмітити, що область детектування лише умовно прив'язана до NaI. Для всіх випадків представленої моделі, детектування виконувалось у решітці, яка складається з 1800 прямокутних об'ємів розмірами $1 \times 1 \times 2,54$ [см] ($X \times Y \times Z$), як показано на Рис. 3.

На Рис. 3 можна побачити, що деякі області детектування перекривають пучок фотонів та сталевий канал. Густина потоку в цих областях не будуть помітно змінюватися у всіх розглянутих випадках. Тому в цих областях відношення густин відбитих потоків при наявності і відсутності дефекту буде майже незмінним (див. зелену центральну область на Рис. 4).

Точність розрахунку представленої моделі, на основі методу Монте-Карло, залежить від кількості процесів взаємодії фотонів з речовиною. В коді Serpent такі процеси називаються «історіями». В даному дослідженні загалом було отримано 100000000 історій взаємодії фотонів з речовиною для кожного випадку з табл. Таблиці 2. Загальна кількість «історій» визначається як добуток двох параметрів: кількості фотонів та кількості партій. У кожному розрахунку випадків з табл. Таблиці 2 було задано 10000 партій, при цьому в кожній партії у об'ємі NaI (джерелі випромінювання) генерувалося 100000 фотонів, кожний з енергією 0,1 MeV та чітко заданим вектором руху вздовж направляючого циліндричного каналу зі сталі. Потім для кожного фотону, згідно з алгоритмами Serpent, розв'язувалася задача переносу, а саме яку відстань пройде фотон та яку енергію матиме в залежності від його початкового стану (енергії) та оточуючого середовища, через яке він проходить. Оскільки в процесі переносу можливі різні варіанти взаємодії частинки з середовищем (поглинання або розсіювання), існує певна доля невизначеності результатів, зафіксованих у зонах детектування. Похибка результатів розрахунку мінімальна в місці просвічування пластини і збільшується лінійно до периферії. Це свідчить про те, що більшість частинок (згідно записаних «історій») опинилися саме у центрі пластини.

A. Просвічування під кутом 45° (кут розсіювання 135°) – випадки C1-1 та C1-2

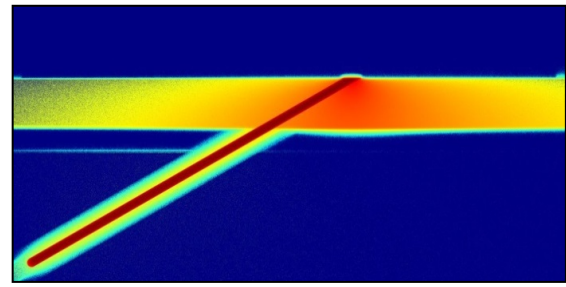
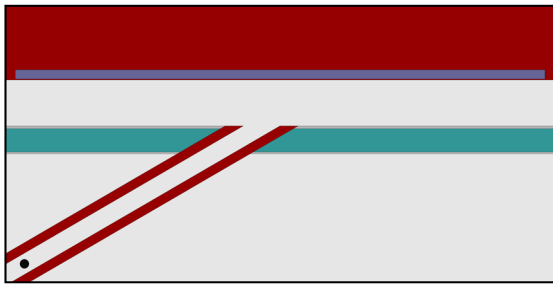
На детекторі отримали розподіли інтенсивності при двох запусках – з дефектом і без дефекту. На Рис. 4 зроблено порівняльний аналіз двох досліджень – C1-1 та C1-2.

Кожен елемент наведеної матриці обчислювався як $\frac{I_d - I_0}{I_d} \cdot 100\%$, де I_d – інтенсивність зворотного випромінювання за наявності дефекту, I_0 – за відсутності дефекту. Як бачимо з Рис. 4, внаслідок наяв-

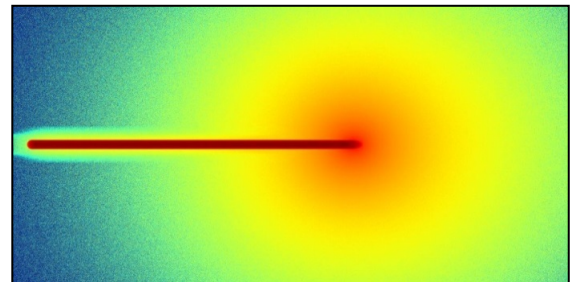
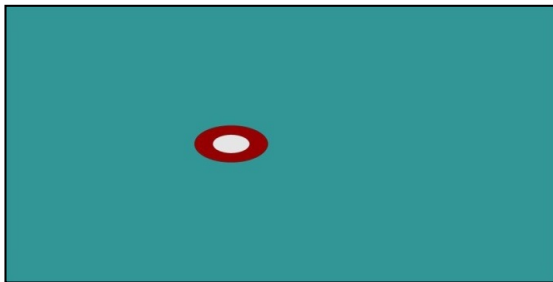
ності свинцевої пластини-дефекту, значна частина випромінювання розсіюється, максимальне відхи-

лення становить 105% .

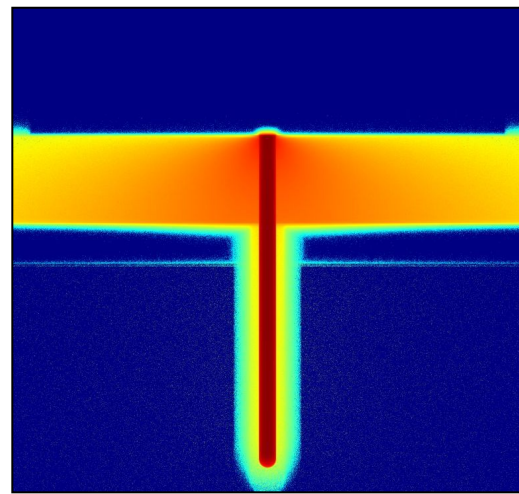
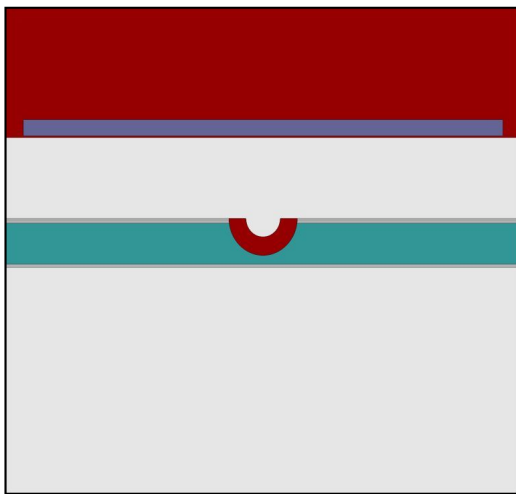
DOI: 10.20535/2523-4455.me.230150



а)



б)



в)

Рис. 2 Візуалізація розрахункової моделі для випадку С3-2 кодом Serpent а) візуалізація у перерізі $X-Z$ ($Y = 0,0$ [см]); б) візуалізація у перерізі $X-Y$ ($Z = 13,00$ [см]); в) візуалізація у перерізі $Y-Z$ ($X = 26,00$ [см]).



Рис. 3 Області детектування густини потоку фотонів (випадок С3-2, $Z = 13$ [см])

В. Просвічування під кутом 30° (кут розсіювання 120°) – випадки С2-1 та С2-2

На Рис. 5 наведена порівняльна характеристика при куті падіння пучка 30° .

Максимальне відхилення між випадками наявності та відсутності дефекту становлять 80% .

Робимо висновок, що результати експериментального моделювання задовольняють теоретичні очікування.

-0,9%	6,2%	15,4%	11,9%	19,5%	15,7%	13,7%	11,5%	17,3%	15,7%	6,8%	16,1%	5,6%	1,9%	4,8%	-4,2%
0,9%	13,4%	13,8%	10,9%	17,3%	10,8%	15,1%	7,3%	21,2%	23,6%	18,2%	14,0%	10,2%	5,0%	11,5%	15,5%
6,9%	13,0%	11,9%	9,1%	14,8%	24,0%	21,6%	14,0%	18,8%	16,0%	18,2%	13,0%	10,6%	9,0%	5,5%	2,5%
10,6%	21,2%	21,5%	18,7%	20,7%	23,3%	23,1%	24,0%	23,7%	17,1%	20,9%	18,0%	13,7%	15,3%	6,1%	7,1%
11,7%	20,4%	20,6%	20,9%	17,4%	27,2%	27,5%	27,7%	31,1%	24,9%	25,4%	17,0%	16,7%	11,2%	7,6%	8,2%
25,1%	28,7%	19,4%	24,3%	30,9%	26,6%	32,2%	34,5%	37,0%	36,7%	30,2%	23,0%	14,7%	11,9%	10,7%	4,5%
18,1%	11,7%	20,1%	32,2%	31,7%	36,9%	41,2%	42,8%	50,6%	41,8%	37,9%	29,6%	20,1%	16,0%	8,7%	6,0%
15,4%	20,1%	25,5%	33,6%	39,6%	44,5%	51,8%	56,3%	57,2%	56,2%	48,6%	37,7%	24,8%	15,5%	8,4%	4,0%
20,4%	20,6%	33,4%	40,4%	42,9%	51,0%	59,8%	68,7%	73,2%	71,5%	61,0%	48,1%	29,7%	17,5%	8,8%	3,5%
21,8%	21,5%	31,3%	40,3%	48,8%	58,1%	69,7%	78,8%	85,3%	83,0%	74,5%	64,7%	54,7%	46,1%	6,3%	1,7%
21,3%	27,6%	32,3%	44,0%	48,2%	49,0%	75,1%	93,2%	103,7%	109,2%	83,4%	54,9%	34,7%	15,2%	6,6%	1,1%
20,0%	27,7%	38,1%	37,0%	56,8%	0,4%	0,2%	0,3%	0,6%	10,5%	104,9%	54,6%	33,6%	14,4%	5,2%	-0,2%
24,0%	29,1%	36,8%	38,7%	44,4%	0,4%	0,1%	0,3%	0,6%	10,9%	106,1%	58,3%	33,4%	14,9%	4,9%	-0,2%
25,2%	30,0%	34,7%	42,5%	47,1%	49,2%	76,0%	93,5%	104,0%	109,3%	83,8%	55,0%	34,6%	15,8%	5,5%	0,3%
18,7%	26,2%	31,3%	38,0%	49,7%	59,1%	68,8%	77,2%	84,4%	83,1%	74,3%	64,6%	54,7%	46,1%	6,3%	1,7%
15,1%	20,2%	30,0%	35,3%	43,6%	54,1%	60,6%	66,2%	73,0%	69,8%	62,2%	45,2%	29,2%	16,0%	9,3%	5,5%
21,8%	19,3%	30,7%	28,9%	31,2%	46,8%	51,2%	56,8%	57,9%	55,3%	48,5%	36,9%	24,5%	16,2%	9,8%	5,7%
21,8%	24,0%	21,1%	30,9%	31,4%	38,0%	42,8%	44,1%	47,2%	41,5%	37,3%	31,7%	20,4%	14,3%	5,6%	3,6%
16,1%	13,9%	16,1%	20,0%	29,7%	29,1%	33,0%	36,5%	35,7%	34,5%	28,2%	21,9%	17,8%	12,3%	9,8%	4,2%
24,0%	19,5%	13,7%	19,1%	22,3%	27,0%	24,5%	32,1%	28,4%	25,7%	25,6%	19,5%	14,4%	10,2%	6,8%	3,6%
11,0%	5,7%	11,4%	20,9%	21,5%	17,9%	25,0%	23,3%	27,2%	20,3%	18,8%	17,9%	15,5%	6,2%	7,3%	8,0%
19,5%	9,1%	11,1%	27,7%	27,7%	15,8%	17,3%	16,5%	19,1%	14,0%	18,8%	15,7%	13,6%	10,9%	3,3%	4,2%
12,7%	17,1%	13,6%	6,8%	11,0%	13,8%	14,9%	13,3%	16,2%	19,1%	7,2%	16,6%	11,9%	13,9%	2,0%	4,7%

Рис. 4 Порівняння інтенсивності зворотного випромінювання C1-1 та C1-2

2,1%	19,2%	9,1%	7,7%	15,9%	13,9%	12,3%	7,5%	15,8%	8,8%	4,7%	4,3%	2,5%	0,1%	4,5%
22,5%	13,3%	9,8%	12,1%	11,4%	8,9%	11,4%	14,4%	14,5%	4,7%	10,7%	10,7%	8,3%	-3,1%	1,2%
18,1%	-1,6%	3,0%	4,4%	4,2%	14,0%	10,6%	11,8%	13,5%	11,7%	11,9%	15,1%	7,9%	5,8%	4,2%
14,5%	14,0%	7,1%	13,1%	11,4%	12,6%	21,3%	12,0%	14,9%	9,7%	6,3%	14,2%	9,7%	7,0%	1,6%
15,6%	4,6%	11,2%	8,8%	18,0%	13,5%	15,3%	18,8%	15,4%	17,6%	15,3%	8,0%	8,5%	4,0%	6,0%
15,3%	6,2%	14,3%	15,3%	14,9%	14,9%	20,4%	23,1%	21,8%	22,5%	16,1%	14,5%	9,3%	9,4%	3,5%
14,2%	14,3%	15,6%	21,5%	17,6%	22,5%	20,9%	26,4%	26,0%	25,1%	23,7%	19,0%	13,6%	8,6%	2,6%
11,2%	19,2%	22,4%	22,6%	23,6%	26,1%	30,8%	35,4%	34,5%	32,8%	29,0%	20,7%	16,0%	9,5%	4,3%
14,4%	16,7%	22,1%	23,5%	26,7%	29,9%	35,7%	40,2%	43,5%	42,8%	38,1%	30,1%	18,8%	8,1%	2,9%
4,4%	15,3%	18,4%	22,1%	29,4%	33,8%	39,9%	46,9%	51,7%	54,0%	48,4%	36,4%	21,8%	9,0%	0,8%
13,3%	20,5%	20,1%	22,4%	30,6%	39,7%	44,7%	54,7%	62,1%	63,3%	59,4%	44,5%	24,0%	7,1%	-2,0%
16,3%	13,4%	12,4%	13,8%	27,3%	35,2%	48,1%	60,8%	72,6%	80,5%	68,3%	43,2%	21,0%	4,9%	-5,6%
13,6%	5,7%	29,5%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,5%	13,6%	80,2%	51,6%	11,8%	0,4%	-7,2%
4,5%	5,0%	29,7%	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,5%	14,1%	81,0%	51,3%	11,8%	0,5%	-7,4%
12,4%	13,0%	11,3%	15,2%	28,8%	35,2%	48,5%	61,0%	72,5%	81,1%	67,3%	42,7%	21,5%	5,1%	-5,3%
15,5%	16,8%	21,7%	25,7%	31,5%	37,3%	44,5%	55,6%	60,3%	63,1%	58,7%	45,0%	24,3%	7,0%	-2,7%
16,4%	10,9%	19,4%	26,6%	26,5%	35,3%	39,7%	46,3%	51,8%	53,2%	48,6%	37,0%	21,5%	9,1%	0,5%
10,8%	18,8%	19,9%	21,1%	27,6%	31,0%	35,2%	40,1%	42,0%	42,4%	38,5%	29,5%	18,8%	9,3%	3,8%
11,5%	12,3%	19,2%	18,3%	18,9%	25,4%	29,6%	33,8%	33,3%	33,6%	30,2%	23,8%	17,6%	8,7%	3,3%
8,2%	13,3%	15,0%	11,2%	22,7%	20,9%	24,6%	26,3%	24,3%	24,4%	22,6%	18,4%	13,7%	8,5%	4,8%
3,5%	12,0%	6,9%	12,1%	14,7%	19,0%	16,6%	23,5%	25,3%	18,4%	17,7%	13,1%	8,6%	5,5%	4,4%
6,7%	9,7%	8,8%	9,2%	11,9%	13,8%	17,7%	17,8%	19,9%	13,5%	12,2%	13,9%	8,5%	7,3%	2,6%
13,7%	8,1%	5,8%	8,9%	18,3%	14,1%	13,7%	9,9%	8,4%	7,7%	14,6%	4,6%	7,4%	1,3%	3,7%

Рис. 5 Порівняння інтенсивності зворотного випромінювання C2-1 та C2-2

38,9%	41,6%	36,7%	40,6%	44,7%	48,2%	50,2%	52,6%	58,0%	53,8%	53,5%	58,3%	57,6%	62,7%	60,6%	60,1%	62,7%	61,0%	59,5%
37,3%	43,8%	48,0%	41,9%	46,2%	46,6%	51,6%	54,1%	55,4%	57,2%	56,4%	58,5%	60,5%	63,4%	62,2%	66,5%	66,0%	66,9%	62,2%
36,3%	45,6%	45,7%	48,8%	50,3%	53,3%	55,5%	52,3%	57,6%	59,5%	60,3%	64,8%	65,4%	66,9%	65,5%	66,5%	66,1%	65,4%	65,6%
39,7%	40,5%	45,7%	49,6%	50,2%	52,1%	53,4%	56,7%	61,4%	62,2%	65,1%	65,3%	67,3%	67,4%	70,6%	71,5%	71,1%	69,4%	68,9%
39,6%	50,8%	46,2%	47,1%	60,6%	58,2%	54,5%	59,7%	59,3%	62,1%	64,8%	66,5%	68,5%	69,3%	71,1%	73,0%	72,7%	72,1%	71,2%
45,1%	41,1%	54,4%	49,0%	51,6%	60,7%	67,6%	66,7%	60,9%	64,8%	64,4%	66,3%	68,2%	70,0%	72,1%	74,2%	73,9%	74,8%	74,3%
45,0%	39,4%	50,6%	46,6%	50,2%	56,6%	64,7%	67,2%	62,7%	64,1%	66,7%	67,6%	70,0%	71,7%	72,8%	74,4%	75,4%	76,2%	75,6%
36,9%	45,6%	44,9%	49,5%	51,4%	56,2%	60,7%	57,9%	62,6%	67,3%	64,7%	68,2%	69,7%	72,0%	74,5%	76,0%	75,6%	76,9%	77,7%
40,3%	47,1%	48,6%	54,5%	49,5%	54,2%	59,4%	58,9%	60,5%	61,9%	67,3%	68,2%	70,2%	71,8%	74,1%	76,3%	76,5%	77,9%	78,2%
45,9%	48,8%	44,4%	43,6%	27,5%	15,9%	12,6%	7,1%	7,8%	9,1%	16,3%	42,5%	71,0%	73,3%	75,0%	76,0%	77,3%	77,9%	79,2%
45,6%	39,4%	41,6%	13,2%	16,7%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	45,3%	77,1%	76,4%	74,3%	76,1%	76,8%	79,1%
44,2%	48,1%	38,2%	13,7%	22,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	39,0%	77,2%	75,4%	75,7%	76,6%	77,7%	79,4%
40,8%	48,0%	46,8%	40,4%	28,3%	15,4%	10,2%	8,9%	7,4%	10,3%	16,1%	42,9%	71,6%	74,0%	72,7%	75,1%	76,3%	77,8%	79,4%
43,8%	43,5%	44,3%	48,7%	54,3%	67,8%	66,7%	68,2%	60,0%	65,4%	67,5%	68,9%	70,4%	70,8%	72,6%	74,3%	76,8%	78,1%	78,0%
43,0%	42,6%	46,4%	47,2%	52,1%	55,7%	57,8%	58,4%	62,2%	65,4%	68,2%	68,3%	70,1%	71,2%	73,4%	74,4%	77,4%	78,9%	78,1%
48,2%	42,8%	46,5%	49,0%	53,5%	54,8%	54,6%	60,4%	60,0%	63,9%	67,2%	68,1%	69,4%	71,0%	74,0%	74,4%	76,2%	74,8%	76,9%
34,3%	46,3%	45,1%	45,2%	50,9%	57,3%	55,2%	59,8%	69,3%	63,9%	64,8%	65,8%	68,7%	71,2%	71,2%	72,8%	74,2%	76,1%	74,5%
39,6%	48,0%	43,2%	45,6%	49,5%	50,8%	55,8%	56,0%	61,3%	61,2%	64,9%	64,7%	67,0%	68,7%	70,0%	72,2%	72,6%	73,4%	70,9%
49,7%	43,0%	45,2%	45,8%	60,1%	60,3%	59,1%	64,7%	57,3%	60,6%	63,1%	63,6%	68,1%	68,4%	67,7%	70,5%	71,4%	70,9%	68,9%
42,1%	47,8%	43,9%	50,6%	45,6%	51,8%	64,2%	55,8%	59,5%	57,7%	60,8%	61,4%	63,0%	67,0%	66,9%	66,5%	68,5%	66,9%	66,0%
41,3%	37,1%	47,1%	42,4%	47,9%	50,4%	57,2%	50,6%	53,7%	58,2%	58,3%	62,4%	63,8%	63,4%	62,3%	66,4%	63,9%	62,9%	62,9%
37,7%	38,3%	43,1%	49,4%	46,5%	53,2%	51,9%	63,4%	58,1%	58,1%	61,3%	63,4%	68,7%	63,0%	61,0%	61,6%	69,8%	58,3%	58,3%
37,1%	37,1%	39,2%	41,4%	46,7%	45,3%	45,4%	50,5%	52,3%	52,9%	55,6%	52,6%	57,1%	58,2%	59,5%	60,5%	67,9%	58,8%	54,0%

Рис. 6 Порівняння інтенсивності зворотного випромінювання C3-1 та C3-2

Згідно (1) енергія розсіяного випромінювання залежить від косинуса кута падіння. Оскільки $\cos 120^\circ = -\frac{1}{2} > \cos 135^\circ = -\frac{\sqrt{2}}{2}$, то енергія розсіяного випромінювання при куті 120° повинна бути бі-



льшою Це підтвердилось експериментально. Енергія випромінювання прямо пропорційна густині потоку. У випадку С2-2 середня густина потоку, зафіксована решіткою з 1800 елементів, становила $1,1 \cdot 10^{-3}$, а у випадку С1-2 ця величина склала $7,9 \cdot 10^{-4}$.

С. Просвічування під кутом 30° (кут розсіювання 120°) – випадки С3-1 та С3-2

В даному випадку було збільшено відстань від просвічуваного об'єкта до детектора з 1 до 5 см. При цьому збільшився тілесний кут розсіювання, що призвело до зростання площі детектора, на якій зафіксовано значне перевищення інтенсивності випромінювання за наявності та відсутності дефекту, як видно з Рис. 6. Дане явище є паразитним і повинно бути враховане при створенні реальної системи.

ВИСНОВКИ

В даному дослідженні доведено можливість використання нового Монте-Карло коду Serpent для моделювання систем на основі зворотно розсіяного випромінювання. Середовище Serpent дозволяє швидко змінювати параметри системи, такі як матеріали, геометричні співвідношення між елементами системи тощо.

Експериментальне дослідження зміни кута просвічування (відповідно кута розсіювання) задовольнило теоретичні очікування. При збільшенні кута розсіювання енергія відбитого випромінювання зменшилась.

Збільшення відстані між досліджуваним об'єктом та детектором призвело до збільшення площі ефективної області дефектування. Втрати енергії при розсіянні в повітряному проміжку, який зріс від 1 см до 5 см, виявились не суттєвими, оскільки в моделі використано матеріали зі значною різницею в густині, а також високу енергію джерела випромінювання.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку ПрАТ НВО "Імпульс" за можливість використання ПЗ [Serpent](#) компанії VTT Technical Research Centre of Finland, Ltd.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A. Sarapata *et al.*, "Quantitative imaging using high-energy X-ray phase-contrast CT with a 70 kVp polychromatic X-ray spectrum," *Opt. Express*, vol. 23, no. 1, p. 523, Jan. 2015, DOI: [10.1364/OE.23.000523](#).
- [2] V. S. K. Yokhana, B. D. Arhatari, T. E. Gureyev, and B. Abbey, "Soft-tissue differentiation and bone densitometry via energy-discriminating X-ray microCT," *Opt. Express*, vol. 25, no. 23, p. 29328, Nov. 2017, DOI: [10.1364/OE.25.029328](#).
- [3] X. Liu, Q. Liao, and H. Wang, "In vivo x-ray luminescence tomographic imaging with single-view data," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 22, p. 4530, Nov. 2013, DOI: [10.1364/OL.38.004530](#).
- [4] D. Shedlock, T. Edwards, C. Toh, D. O. Thompson, and D. E. Chimenti, "X-RAY BACKSCATTER IMAGING FOR AEROSPACE APPLICATIONS," in *AIP Conference*, 2011, pp. 509–516, DOI: [10.1063/1.3591894](#).
- [5] C. N. Boyer, G. E. Holland, and J. F. Seely, "Portable hard x-ray source for nondestructive testing and medical imaging," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 69, no. 6, pp. 2524–2530, Jun. 1998, DOI: [10.1063/1.1148953](#).
- [6] J. Xu, X. Wang, Q. Zhan, S. Huang, Y. Chen, and B. Mu, "A novel lobster-eye imaging system based on Schmidt-type objective for X-ray-backscattering inspection," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 87, no. 7, p. 073103, Jul. 2016, DOI: [10.1063/1.4955472](#).
- [7] V. Grubsky, M. Gertsenshteyn, T. Jansson, and G. Savant, "Non-scanning x-ray backscattering inspection systems based on x-ray focusing," 2007, p. 65401N, DOI: [10.1117/12.720018](#).
- [8] A.-S. Lalleman *et al.*, "A dual X-ray backscatter system for detecting explosives: Image and discrimination of a suspicious content," in *2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2011, pp. 299–304, DOI: [10.1109/NSSMIC.2011.6154503](#).
- [9] A. Sharma, B. S. Sandhu, and B. Singh, "Incoherent scattering of gamma photons for non-destructive tomographic inspection of pipeline," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 68, no. 12, pp. 2181–2188, Dec. 2010, DOI: [10.1016/j.apradiso.2010.05.007](#).
- [10] J. L. Glover and L. T. Hudson, "A method for organic/inorganic differentiation using an x-ray forward/backscatter personnel scanner," *X-Ray Spectrom.*, vol. 42, no. 6, pp. 531–536, Nov. 2013, DOI: [10.1002/xrs.2514](#).
- [11] J. van den Heuvel and F. Fiore, "Simulation study of x-ray backscatter imaging of pressure-plate improvised explosive devices," 2012, p. 835716, DOI: [10.1117/12.918547](#).
- [12] J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen, V. Valtavirta, and T. Kaltiaisenaho, "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 82, pp. 142–150, Aug. 2015, DOI: [10.1016/j.anucene.2014.08.024](#).
- [13] A. Wei, Z. Han, B. Chang, H. Li, J. Shan, and D. Du, "Monte Carlo simulation of X-ray backscatter detection for the seam tracking when welding sandwich panels," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1074, p. 012186, Sep. 2018, DOI: [10.1088/1742-6596/1074/1/012186](#).
- [14] S. Huang, X. Wang, Y. Chen, J. Xu, T. Tang, and B. Mu, "Modeling and quantitative analysis of X-ray transmission and backscatter imaging aimed at security inspection," *Opt. Express*, vol. 27, no. 2, p. 337, Jan. 2019, DOI: [10.1364/OE.27.000337](#).
- [15] "ASTM A36 Mild/Low Carbon Steel," 2012. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6117>. [Accessed: 07-Apr-2021].

Надійшла до редакції 28 квітня 2021 р.

Прийнята до друку 19 жовтня 2021 р.



Application of Serpent Monte Carlo Code for Modeling of Non-destructive Systems Based on Backscattered X-Rays

A. M. Bozhuk^f, ORCID [0000-0002-1488-2767](https://orcid.org/0000-0002-1488-2767)

S. R. Mykhailov^g, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-4314-785X](https://orcid.org/0000-0002-4314-785X)

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

O. R. Trofymenko, ORCID [0000-0002-7704-0911](https://orcid.org/0000-0002-7704-0911)

National Academy of Sciences of Ukraine. Institute for safety problems of nuclear power plants,
www.ispnpp.kiev.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—Research of objects with unilateral access is a promising area for the development of non-destructive testing systems. To create a real system and determine its optimal parameters, it is important to conduct preliminary computer simulations. The paper is devoted to creating model of a non-destructive system based on backscattered X-rays in Serpent Monte Carlo code. There are no known studies of the use of Serpent software to build such models. The purpose of the study was to confirm the possibility of detecting a defect, i.e., a material of a different density than the test object, which was placed in this object.

A model was created, the main components of which were the radiation source, the object under study, the defect, and detector of backscattered radiation. Experiments were performed for several combinations of system parameters, in particular when changing the angle of illumination and the distance between the object and the detector. The energy of the radiation source used in the study was 100 keV. The test object of study was a steel plate, which contained a defect — a lead plate. Calculations were performed for six cases at illumination angles of 30 and 45 degrees (scattering angles of 120 and 135 degrees, respectively), and the distance between the object and the detector 1 and 5 cm. The detector was a plane that coincided with a NaI scintillation plate of 60 by 30 cm in size. It was conventionally divided into 1800 elements to detect the flux density of backscattered radiation.

A qualitative and quantitative analysis of the results met theoretical expectations. In particular, the Compton equation was fulfilled, which states that as the cosine of the scattering angle θ increases, the energy of scattered radiation also increases. In the case of $\theta = 120^\circ$, the average flux density of backscattered radiation recorded by the detector was $1.1 \cdot 10^{-3}$ units per square centimeter per second, and in the case of $\theta = 135^\circ$, this value was $7.9 \cdot 10^{-4}$.

The results of the study can be used to build real non-destructive testing devices. These devices can be used in medicine, industry and security systems. The model has some limitations. The radiation source in this model is monoenergetic, in contrast to classical X-ray systems, in which the radiation has a spectrum. Also a defect is a plate of large area, which is almost equal to the area of the object under study. For practical use the device must be capable to detect a defect many times smaller than the object under study, such as a void in the weld, a tumor in the human body, or smuggled substances. The model can be improved in the future.

Keywords — Serpent; non-destructive testing; x-rays; backscattered rays.

