

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторної роботи

**Симуляційне моделювання систем радіаційного захисту
та контролю**

з навчальної дисципліни
«Основи радіаційної безпеки-2» (бакалавр)

для студентів денної та заочної форми навчання
спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Затверджено
на засіданні групи
забезпечення спеціальності
Протокол № 4
від «03» 05 2023р.

Одеса – 2023

Методичні вказівки до лабораторної роботи «Симуляційне моделювання систем радіаційного захисту та контролю» з навчальної дисципліни «*Основи радіаційної безпеки-2*» (бакалавр) для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності 183-«Технології захисту навколишнього середовища» /Співак А.Я. Одеса, ОДЕКУ, 2023. 15 стор.

Укладач: Співак А.Я., канд. фіз.-мат. наук, ст. викл.

Під загальною редакцією Герасимова О.І., д.ф.-м.н., проф., зав. каф. Фізики та Технологій захисту навколишнього середовища

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	4
1 Теоретична частина.....	6
1.1 Метод моделювання	6
1.2 Властивості випромінювання.....	10
2 Експериментальна частина.....	13
2.1 Завдання.....	13
2.2 Порядок виконання роботи (вказівки до дій).....	13
2.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	14
Література.....	15

ВСТУП

Ці методичні вказівки призначені для ознайомлення студентів із можливостями симуляційних методів моделювання систем радіаційного захисту та контролю.

Данні вказівки для підготовки до лабораторної роботи «Симуляційне моделювання систем радіаційного захисту та контролю» рекомендуються для студентів РВО «бакалавр» (у лабораторному блоці навчальної дисципліни «*Основи радіаційної безпеки*»). Вони також можуть бути корисними у деяких інших спецкурсах, зокрема:

- для студентів РВО «бакалавр» (у лабораторному блоці навчальної дисципліни «*Радіоекологія*»)
- для студентів РВО «бакалавр» (у лабораторному блоці навчальної дисципліни «*Технології контролю якості харчової та промислової продукції*»)
- для студентів РВО «магістр» (у лабораторному блоці «*Спеціальні розділи радіоекології*»)

денної та заочної форми навчання спеціальності 183-«Технології захисту навколишнього середовища»; а також

- для слухачів курсів підвищення кваліфікації за фахом «Радіаційна безпека і радіаційний контроль» (у лабораторному блоці КПК).

Вони також можуть стати корисними для отримання даних до практичних завдань та КП з окремих дисциплін спеціальних дисциплін, а також при написанні кваліфікаційних робіт.

Лабораторна робота
**Симуляційне моделювання систем радіаційного захисту
та контролю**

Мета роботи: набути практичні навички роботи з алгоритмами симуляційного моделювання для розв'язання задач радіаційного захисту та контролю.

Для виконання роботи рекомендується використовувати наступне програмне забезпечення:

- MatLab
- SciLab

Для отримання радіофізичних характеристик джерел випромінювання рекомендується використовувати бази даних наступних програмних продуктів:

- GammaLab
- RadDecay

Нижче, у *теоретичній частині* дається стисла інформація стосовно методу моделювання та властивостей випромінювання, урахування яких впливатиме на результати моделювання, а у *експериментальній частині* наведені завдання та послідовність їх виконання. Наприкінці лабораторної роботи наведені питання для самоперевірки, а також література що рекомендується або пов'язана з цими методичними вказівками.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Метод моделювання

Завдяки складності отримання точних аналітичних розв'язків для більшості практичних завдань теоретичної дозиметрії та радіометрії [1-13], велике поширення набули методи чисельного моделювання (симуляційні методи). Користуючись тим, що явище радіоактивності носить випадковий характер (тут можна згадати наприклад кота Шрьодингера який живий чи мертвий лише з деякою ймовірністю), моделювання окремих задач радіаційного захисту та контролю досить ефективно здійснюється за допомогою такого методу як Монте-Карло.

Для розуміння того, як саме здійснюється моделювання розглянемо величини які підлягають вимірюванню шляхом чисельного моделювання методом Монте-Карло, тобто «симуляційному» вимірюванню.

Приклад просторового розподілу потужності радіаційних полів, що створюються модельними пробами різних форм (див. Рис.1), наочно демонструє залежність рівня радіації в околі джерел від їх геометрії. Цей приклад спонукає до врахування цього фактору впливу.

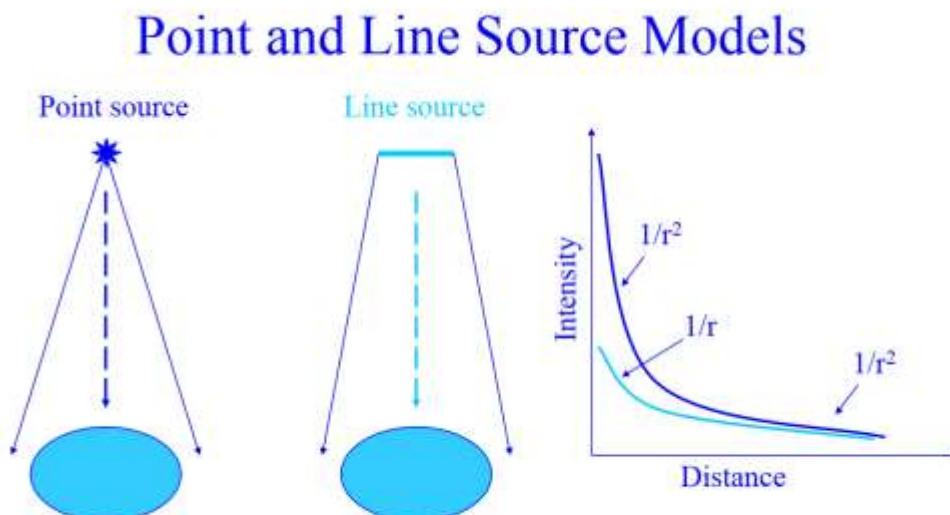


Рисунок 1 – Залежність рівня радіації від різних модельних джерел випромінювання (запозичено з [12])

Геометричний фактор

Для отримання об'єктивних даних під час спектроскопічних досліджень іонізуючих випромінювань окрім багатьох інших параметрів треба враховувати геометрію проби і детектора, а також відстань між ними [7-9]. Перелічені фактори характеризуються величиною яка отримала назву - *геометричний фактор*.

Геометричним фактором (G) називається - відношення кількості іонізуючих частинок, що потрапили у робочий об'єм детектора, до загальної їх кількості випромінених пробою.

Точне знаходження G , для довільних за формою та розмірами детектора і проби - є складною математичною задачею. Тому важливо знати точні розв'язки для простих випадків.

Приклади точного розрахунку

Розглянемо так звану, точкову пробу [7-9], випромінювання якої потрапляє до детектора крізь елемент плоскої поверхні (вхідне вікно детектора) прямокутної форми і розмірами $a \times b$. Вважаємо що поглинання у пробі відсутнє. У найпростішому випадку точкова проба знаходиться на осі детектора на відстані d .

З визначення геометричного фактора витікає, що для точкової проби він може бути знайдений як відношення тілесного куту Ω (у стерadiansах), який вирізається створом детектора, до 4π

$$G = \frac{\Omega}{4\pi}. \quad (1)$$

Тілесний кут Ω може бути знайдений інтегруванням по поверхні S , яка вирізається кутом Ω на сфері радіусом r

$$\Omega = \int_s d\Omega = \int_s \frac{dS}{r^2}. \quad (2)$$

Наприклад, для детектора із вхідним вікном прямокутного перерізу, може бути знайдений тілесний кут Ω , що обмежується променями точкового джерела, у наступному вигляді [7]:

$$\Omega = 4 \arctg \frac{ab}{2d\sqrt{a^2 + b^2 + 4d^2}}. \quad (3)$$

Перевіримо (3), використавши цей розв'язок для знаходження G у випадку точкового джерела іонізуючого випромінювання розташованого у центрі куба стороною a , де одна з граней є поверхнею детектора

квадратного перерізу. За таких умов слід прийняти, що $d = \frac{a}{2}$ та $b = a$.
Результат розрахунку наведено нижче

$$\Omega = 4 \operatorname{arctg} \frac{a^2}{2 \cdot \frac{a}{2} \sqrt{a^2 + a^2 + 4 \left(\frac{a}{2}\right)^2}} = 4 \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{2}{3} \pi. \quad (4)$$

Саме такий результат можна отримати якщо згадати що площини проведені з ребер куба крізь його центр розподіляють його на 6 однакових пірамід. Таким чином $\Omega = \frac{4\pi}{6} = \frac{2}{3} \pi$, що точно співпадає з попереднім результатом.

Часто детектор має циліндричну форму, тому розрахуємо тілесний кут Ω який вирізається променями точкової проби потрапившими до детектора. Приймаємо, що проба знаходиться на осі детектора. Елемент поверхні dS у такому випадку зручно надати за допомогою сферичних координат $dS = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$, тоді згідно до (2) отримуємо

$$\begin{aligned} \Omega &= \iint_S \sin \theta d\theta d\varphi = \int_0^\theta \left(\int_0^{2\pi} d\varphi \right) \sin \theta d\theta = \\ &2\pi \int_0^\theta \sin \theta d\theta = 2\pi (-\cos \theta)_0^\theta = 2\pi (-\cos \theta + 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо радіус циліндричного детектора R , а найкоротша відстань до проби d , тоді з урахуванням (1) маємо

$$G = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \operatorname{arctg} \frac{R}{d} \right). \quad (6)$$

Для перевірки (6) знайдемо геометричний фактор у випадку $d = 0$, тобто точкове джерело знаходиться на поверхні циліндричного детектора. У такому випадку маємо: $\operatorname{arctg} \frac{R}{0} = \frac{\pi}{2}$, $\cos \frac{\pi}{2} = 0$, тоді $G = \frac{1}{2}$. Цей результат точно співпадає з уявленнями про те, що у зазначеному випадку проба випромінює до детектора у тілесному куті $\Omega = 2\pi$.

Якщо проба розподілена по об'єму, тобто не є точковою, G шукають чисельними методами, з використанням методу Монте-Карло. При цьому треба враховувати поглинання та розсіяння випромінювання у самій пробі.

Нижче дається приклад простого коду у середовищі MATLAB для розрахунку геометричного фактора G , тобто частки частинок що потрапляють до детектора циліндричної форми від циліндричної проби з урахуванням поглинання випромінювання за експоненціальним законом від пробігу.

```

clear all
clc
D=0.08;% - діаметр детектора, м (8см)
H=0.02;% - товщина проби, м (2 см)
h=0.005;% - проміжок між пробою та детектором, м (5мм)
teta=0:pi/2/90:pi/2;
fi=0:2*pi/360:2*pi;
mu=log(2)/0.001;% - лінійний коефіцієнт поглинання,
                %де 0.001 м (1мм)– це товщина напівослаблення
                %матеріалу проби
N0=1;
n=100;%кількість повторень алгоритму
N=0;
m=0;
for i=1:n;
    x=rand*D/2;%генерація випадкових просторових координат
    точкових джерел
    y=rand*D/2;
    z=rand*(H-h);
    if x^2+y^2<=D^2/4;%перевірка чи належить точка простору проби
        for j=1:length(teta);
            R=(H-z)/cos(teta(j));
            ro=(H-z)*tan(teta(j));
            for k=1:length(fi);
                m=m+1;
                x0=ro*cos(fi(k));
                y0=ro*sin(fi(k));
                x1=x0-x;
                y1=y0-y;
                if x1^2+y1^2<=D^2/4; %умова потрапити променю до
детектора
                    r=R*(1-h/(H-z));%розрахунок пробігу у пробі
                    N=N+N0*exp(-mu*r);%врахування поглинання у пробі
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
end;
end;

```

end;

$\Omega = N / (2 * N_0 * m) * 4$ %еквівалентний тілесний кут

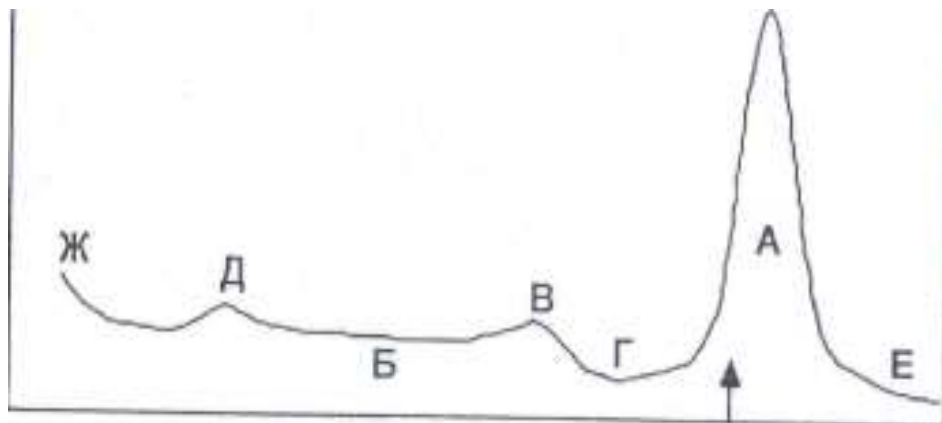
$G = N / (2 * N_0 * m)$ % – шуканий геометричний фактор.

У вищезазначеному алгоритмі прийнято, що проба випромінює моноенергетичні промені, а також невраховані процеси розсіяння. Для променів з різними енергіями звичайно задача ускладнюється, наприклад, треба враховувати залежність коефіцієнта поглинання від енергії випромінювання.

1.2 Властивості випромінювання

Спектральні характеристики

Реалістичне представлення гамма-спектра, утвореного детектором від потоку моноенергетичних гамма-квантів, наведене на Рис.2. Спектральні характеристики, відмічені буквами від А до Ж, описані нижче.



Е

Рисунок 2 – Реалістичне представлення спектра детектора гамма-випромінювання від моноенергетичного джерела гамма-квантів

А. Пік повного поглинання (фотопик). Цей пік об'єднує імпульси, що виникають в результаті фотоелектричної взаємодії з повною втратою енергії в середовищі детектора. Деякі відліки виникають також в результаті одиничних або багатократних подій комптонівського розсіяння, за якими йде фотоелектричне поглинання. Ширина цього піку визначається, в основному, статистичними флуктуаціями величини заряду, утвореного цими взаємодіями, а також вкладом від електроніки обробки імпульсів. Центроїда піку відповідає енергії фотона Е. Площу піку за

вирахуванням фону представляє повне число взаємодій з повною втратою енергії в детекторі і зазвичай пропорційна масі випромінюючого ізотопу.

Б. Континуум комптонівського фону. Ці імпульси, гладко розподілені до максимальної енергії E_c , утворюються в результаті взаємодій, що відбуваються тільки з частковою втратою енергії фотона в детекторі. У складніших спектрах комптонівське розсіяння є основним джерелом фонових відліків під піками повного поглинання.

В. Комптонівський край. Це частина спектру, яка відповідає максимальній втраті енергії фотоном, що падає, в процесі комптонівського розсіяння. Вона є широким асиметричним піком, що відповідає максимальній енергії E_c , яку фотон гамма-випромінювання з енергією E_0 може передати вільному електрону у одноразовій події розсіяння. Це відповідає «лобовому» зіткненню між фотоном і електроном, в результаті якого електрон рухається вперед, а гамма-квант розсіюється назад на 180° .

Г. «Комптонівська долина». Для моноенергетичного джерела імпульси у цій області виникають або в результаті багатократного комптонівського розсіяння, або в результаті взаємодій з повною втратою енергії фотонами, які піддалися розсіянню на невеликі кути (у матеріалі джерела або в проміжних матеріалах) перед тим, як потрапити до детектора. Нерозсіянні фотони моноенергетичного джерела не можуть утворювати імпульси в цій області в результаті одноразової взаємодії в детекторі. У складніших спектрах ця частина спектру може містити імпульси, утворені в результаті комптонівського розсіяння фотонів вищої енергії.

Д. Пік зворотнього розсіяння. Цей пік обумовлений гамма-квантами, які піддалися комптонівському розсіянню в одному з матеріалів, що оточує детектор. Гамма-кванти, розсіяні більш ніж на $110-120^\circ$, матимуть майже однакові енергії в діапазоні від 200 до 250 кеВ. Отже, внесок від моноенергетичного джерела представлятиме безліч розсіяних гамма-квантів, енергії яких знаходяться поблизу цього мінімального значення.

Е. Область надмірної енергії. У разі моноенергетичного джерела події в цій області обумовлені гамма-квантами високих енергій і мюонами космічного випромінювання, присутніх у природному фоні, і подіями накладення імпульсів, якщо швидкість лічби досить висока. У складніших спектрах відліки вище цього фотопіку в основному уявляють собою події комптонівського розсіяння гамма-квантів вищої енергії.

Ж. Підняття в області низьких енергій. Ця характеристика спектру, дуже близька до області «нульової амплітуди імпульсу», виникає, як правило, від низкоамплітудного електронного шуму в детектувальній системі, який сприймається аналогічно низкоамплітудним імпульсам детектора. Існує тенденція появи такого шуму при досить високій частоті отримання імпульсів і, таким чином, проявляється як явище

високої швидкості лічби. Електронний шум зазвичай фільтрується електронним способом, так що цей ефект зазвичай не погіршує отриманий спектр. У складніших спектрах гамма-випромінювання, багато різних енергій фотонів, що містять, риси комптонівського краю і піку зворотного розсіювання прагнуть до «розмиття», залишаючи, в основному, піки повного поглинання на відносно гладкому комптонівському фоні.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Завдання

Варіант завдання відповідає порядковому номеру студента у контингенті групи, тобто з переліку де прізвища впорядковано за абеткою.

Таблиця 1 – Варіанти параметрів системи для виконання симуляцій

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8
Параметри джерела								
<i>Ізотоп</i>	¹³¹ I	¹⁴⁴ Ce	¹⁰⁶ Ru	¹³⁴ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	²⁴¹ Pu
<i>Активність: A, кБк</i>	8	6	5	10	7	4	2	1
<i>Товщина: d, мм</i>	20	60	30	10	20	50	0,1	0,1
<i>Густина: ρ, г/см³</i>	1	1	0,8	0,8	1,5	1,5	2	2
Параметри детектора								
<i>Розмір: D (або a x b), см</i>	8	6x10	6,5	10	7x7	5x5	15	3
<i>Ефективність реєстрації: eff, %</i>	75	90	60	95	80	88	100	50
Параметри взаємного розташування детектора та проби *)								
<i>Відстань: l, мм</i>	10	5	100	30	65	15	80	45

*) для спрощення, розглядаються лише розташування детектора та проби на осях симетрії

2.2 Порядок виконання роботи (вказівки до дій)

1. Отримати персональне завдання згідно свого варіанту у Табл.1.
2. Провести із своїми параметрами моделювання системи радіаційного захисту/контролю, використовуючи запропонований у теоретичній частині код, варіюючи при цьому кількість симуляцій.
3. Проаналізувати отримані осереднені за багатьма симуляціями значення, порівнюючи їх з відомими аналогами.

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Що таке симуляція ?
2. Який метод чисельного моделювання використовується для моделювання задач радіаційного захисту та контролю?
3. Чому методи, що базуються на випадковості дають непогані результати у задачах дозиметрії та радіометрії?
4. Як впливає неоднорідність розподілу радіонуклідів у пробі на результати «симуляційних» вимірювань.
5. Для яких геометрій проб можна нехтувати поглинанням випромінювання у самій пробі?
6. Перелічте найбільш поширені геометрії для вимірювання харчової та промислової продукції?

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97); Державні гігієнічні нормативи. Київ: Відділ поліграфії Українського центру держсанепіднагляду МОЗ України, 1997. 121с.
2. Герасимов О.І. Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища : підручник. Одеса: ОДЕКУ, 2023. 168с. ISBN 978-966-186-266-0 <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/11901>
3. Герасимов О.І., Курятников В.В., Кудашкіна Л.С., Співак А.Я., Кільян А.М. Методи організації радіаційної безпеки : навчальний посібник. Одеса: ОДЕКУ, 2022. 183 с. ISBN 978-966-186-213-4 <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint>
4. Gerasymov O.I., Andrianova I.S. Radiation safety : Textbook | Радіаційна безпека : підручник (англійською мовою). Одеса: ОДЕКУ, 2020. 148с. ISBN 978-966-186-138-0 <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9216/>
5. Герасимов О.І. Радіоекологія за галузями : підручник. Одеса: ТЕС, 2016. 100с. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/1100>
6. Герасимов О.І. Елементи фізики довкілля : навчальний посібник. Одеса: ТЕС, 2004. 144с. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/1092/>

Додаткова

7. Кільян А.М., Курятников В.В., Онисько О.І., Співак А.Я. Спектроскопія іонізуючого випромінювання : методичні вказівки до практичних робіт. Одеса: ОДЕКУ, 2010. 52 с.
8. Курятников В.В., Співак А.Я., Кільян А.М. Фізичні основи радіометрії та дозиметрії : Збірник методичних вказівок до лабораторних робіт. Одеса: ОДЕКУ, 2008. 34 с.
9. Reilly, D., Ensslin, N., Smith Jr, H., & Kreiner, S. (1991). *Passive nondestructive assay of nuclear materials* (No. NUREG/CR-5550; LA-UR-90-732). Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Office of Nuclear Regulatory Research; Los Alamos National Lab., NM (United States). https://cdn.lanl.gov/files/passive-nondestructive-assay-of-nuclear-materials_68e9a.pdf
10. Desrosiers M. et al. The importance of dosimetry standardization in radiobiology //Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. 2013. Vol.118. P.403. <https://doi.org/10.6028/jres.118.021>
11. Medical (Archive): Workshop for Radiobiology Dosimetry Standardization <https://www.nist.gov/programs-projects/medical-archive-workshop-radiobiology-dosimetry-standardization>
12. Bourland D. Radiation source: external beam, isotope. In: Med. (Arch.) [11]. <https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/FT11Bourland.pdf>
13. Hanson W. Important Concepts in Radiobiology Dosimetry. In: Medical (Archive) [11]. <https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/04/28/FT9Hanson.pdf>