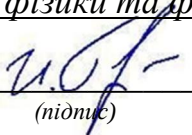


Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Фізико-технічний факультет»
Кафедра прикладної фізики та фізики плазми

До захисту допущено

Кафедрою прикладної фізики та фізики плазми протокол № 11 від 17.06.2026 р.

завідувач кафедри


(підпис)

Ігор ГАРКУША

(ім'я, прізвище)

«18» червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Калібрування гама-детекторів для ефективного визначення ядерно-фізичних характеристик радіоактивних зразків

Спеціальність (спеціалізація) 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма Прикладна фізика

Здобувач


(підпис)

Юлія БОЙКО

(ім'я, прізвище)

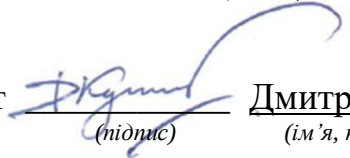
Науковий керівник


(підпис)

Інна АФАНАСЬЄВА

(ім'я, прізвище)

Рецензент


(підпис)

Дмитро КУТНІЙ

(ім'я, прізвище)

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

У цій бакалаврській роботі розглядається процес калібрування гамма-детекторів з надчистого германію (HPGe) для підвищення ефективності визначення ядерно-фізичних характеристик радіоактивних зразків. У роботі детально описані основні принципи гамма-спектрометрії та ключові етапи калібрування детекторів, включаючи визначення мертвого часу та дослідження кутової ефективності. Побудовано та проаналізовано криву внутрішньої ефективності детектора. Досліджено оптимальні умови вимірювань для мінімізації відхилень від ідеальних показників. Крім того, в рамках роботи були розроблені спеціалізовані скрипти на мові програмування Python, призначені для автоматизації та прискорення процесу обробки великих масивів спектрометричних даних. Результати роботи можуть бути використані для оптимізації процесів вимірювання та аналізу в лабораторіях ядерної фізики.

Ключові слова: гамма квант, детектування, радіоактивність, внутрішня ефективність, геометрія вимірювання.

ABSTRACT

This bachelor's thesis investigates the calibration process of High-Purity Germanium (HPGe) gamma detectors to improve the efficiency of determining the nuclear-physical characteristics of radioactive samples. The study details the fundamental principles of gamma spectrometry and the key stages of detector calibration, including dead-time determination and angular efficiency analysis. The intrinsic efficiency curve of the detector was established and analyzed. The optimal measurement conditions were investigated to minimize deviations from ideal performance. Additionally, specialized Python scripts were developed to automate and accelerate the processing of large volumes of spectrometric data. The results of this study can be applied to optimize measurement and analysis processes in nuclear physics laboratories.

Keywords: gamma quantum, detection, radioactivity, internal efficiency, measurement geometry

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІЯ ТА ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ РАДІОКТИВНОСТІ.....	7
1.1 Визначення спектроскопії	7
1.2 Основні типи детекторів іонізуючого випромінювання.....	8
1.3 Принцип отримання та обробки електричного сигналу	10
1.4 Роздільна здатність детектора.....	10
1.5 Калібрування детектора за енергією.....	12
1.6 Вимірювання радіоактивності за допомогою гамма-детектора	13
1.7 Функція передачі	15
1.7.1 Ефект самопоглинання	16
1.7.2 Геометрична ефективність.....	16
1.8 Внутрішня ефективність.....	17
РОЗДІЛ 2 МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ДЕТЕКТОРА HPGe	19
2.1 Будова детектора HPGe	19
2.2 Метод визначення внутрішньої ефективності.....	20
2.3. Обґрунтування спрощувальних припущень.....	21
2.3.1 Вибір геометрії вимірювань	22
2.3.2 Особливості застосування пасивного екранування.....	22
2.4 Еталонні джерела	23
2.5 Процедура калібрування.....	24
2.5.1 Калібрування за енергією	24
2.5.2 Визначення внутрішньої ефективності реєстрації	25
2.5.3 Тест мертвого часу	26
2.5.4 Тест кутової ефективності	28
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ	30
3.1 Аналіз даних та автоматизація аналізу	30
3.1.1 Аналіз спектрів із тестів мертвого часу та кутової ефективності	31

3.1.2	Аналіз флуктуацій фонового шуму.....	31
3.2	Аналіз результатів.....	33
3.2.1	Результат тесту внутрішньої ефективності.....	33
3.2.2	Результат тесту мертвого часу.....	35
3.2.3	Результати вимірювання кутової ефективності.....	37
ВИСНОВКИ		39
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ		41
ДОДАТОК		42

ВСТУП

Одним із ключових завдань гамма-спектрометрії є підтвердження задекларованої активності радіоактивних об'єктів шляхом розрахунку чистих площ відповідних фотопіків. Окреслене завдання є двокомпонентним. Фізичний аспект полягає в енергетичній залежності відгуку детектора (врахування процесів взаємодії, самопоглинання, ослаблення випромінювання на шляху поширення, а також ближньої та дальньої геометрії вимірювань).

Метрологічний аспект зумовлений необхідністю гарантувати відстеження та контрольовану невизначеність для задоволення вимог при відправці на регульований полігон. У цьому дослідженні систематизовано метод калібрування внутрішньої ефективності системи та її перевірки (зокрема, щодо мертвого часу та кутової залежності відгуку). Це дозволяє забезпечити точний перерахунок кількості зареєстрованих імпульсів у реальну активність A за допомогою базового аналітичного рівняння.

Основні завдання:

- 1) забезпечення лінійності каналу – енергії та стабільної роздільної здатності;
- 2) чітке моделювання абсолютної ефективності виявлення шляхом контролю цих компонентів;
- 3) перевірка сумісності невизначеності з вимогами, прийнятими ANDRA.

Потреби цих досліджень можна згрупувати наступним чином:

- 1) функціональні потреби:
 - Забезпечення робочого енергетичного діапазону від 50 до 1500 кеВ.
 - Забезпечення широкого динамічного діапазону за активністю: від фонових рівнів до роботи в умовах високих завантажень спектрометричного тракту.

- Гарантування відтворюваності результатів (автоматична генерація вихідних файлів даних, ROI та формування звітів).

2) операційні потреби:

- Контрольована геометрія (використання механічних орієнтирів, фіксована відстань «джерело-детектор»).
- Оптимізація захисту (відповідне свинцеве екранування та коліматор).
- Оптимізація часу експозиції відповідно до необхідної пропускної здатності.
- Впровадження процедур контролю та компенсації дрейфу спектрометричного тракту.

3) потреби у відстеженні:

- Архівування первинних спектрів та протоколів обробки фотопіків.
- Ведення технічної документації щодо калібрування системи.

РОЗДІЛ 1

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІЯ ТА ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ РАДІОКТИВНОСТІ

Розділ присвячено аналізу теоретичних основ гамма-спектрометрії та фундаментальних принципів визначення радіоактивності нуклідів. Особливу увагу приділено таким критичним метрологічним характеристикам системи, як енергетична роздільна здатність та процедура калібрування спектрометра за енергією за допомогою еталонних джерел. Крім того, у розділі математично обґрунтовано перехід від зареєстрованої швидкості рахунку у фотопіку до абсолютної активності досліджуваного зразка. Цей перехід реалізовано через введення функції передачі вимірювальної системи, яка враховує внутрішню ефективність кристала, геометричний фактор реєстрації та специфіку ефекту самопоглинання випромінювання в матриці об'єкта.

1.1 Визначення спектроскопії

Спектрометрія – це сукупність експериментальних або теоретичних методів дослідження розподілу фізичної величини (найчастіше енергії або інших параметрів, що безпосередньо з нею пов'язані) за її спектром [1].

Гамма-спектрометрія є методом прямого неруйнівного аналізу гамма-випромінювання, який не потребує попереднього хімічного розділення зразків. Цей метод дає змогу ідентифікувати радіонукліди та кількісно визначати активність як природних (переважно К-40) так і штучних (наприклад, Ва-133, Cs-137) радіоізотопів у різних типах зразків.

Оскільки існує понад 2000 радіоактивних нуклідів, кожне з яких має власний спектр випромінювання, важливим завданням є точне визначення енергії випромінюваних гамма-квантів для їхньої достовірної ідентифікації. Енергетичні лінії, що розташовані занадто близько одна до одної, можуть перекриватися, стаючи нерозрізненими на спектрі.

Фізичні основи гамма-спектрометрії та особливості аналізу спектрів описані в класичних працях Knoll і Gilmore [1] [2].

Виміряна енергія гамма-кванта дозволяє ідентифікувати радіонуклід, який його випромінює, оскільки кожен радіонуклід має характерний набір дискретних енергетичних станів, процес переходу між якими може супроводжуватися випромінюванням гамма-квантів певної енергії. Ці енергії чітко визначені та занесені до баз даних (наприклад, IAEA, ENSDF тощо). Коли радіоактивне ядро переходить зі збудженого стану в нижчий стан, воно випромінює квант гамма-енергії з фіксованою величиною, яка залежить від різниці між рівнями. Таким чином, вимірюючи енергію піку в спектрі, можна порівняти її з еталонними значеннями і визначити, якому радіонукліду вона відповідає. Якщо спектр містить кілька піків, їх сукупність (позиції та відносна інтенсивність) дозволяє більш надійно ідентифікувати джерело випромінювання, особливо у випадку змішаних або забруднених зразків.

1.2 Основні типи детекторів іонізуючого випромінювання

Реєстрація гамма-випромінювання є ключовою задачею ядерної спекторметрії, і вибір детектора безпосередньо визначає якість результатів вимірювань. Попри різноманіття конструктивних рішень, усі детектори іонізуючого випромінювання об'єднує один принцип: проходження кванта через чутливий об'єм детектора супроводжується передачею енергії, яка перетворюється на вимірюваний електричний сигнал. За типом чутливого середовища і механізмом реєстрації детектори поділяються на три основні класи: газові іонізаційні, сцинтиляційні та напівпровідникові. [1]

Газові іонізаційні детектори використовують той факт, що іонізуюче випромінювання при проходженні через газ залишає за собою пари іонів та вільних електронів. Прикладена між електродами напруга призводить до дрейфу носіїв заряду і утворення вимірюваного струму або імпульсу. Залежно від величини електричного поля і режиму роботи розрізняють три конфігурації: іонізаційні камери (реєструють весь первинно утворений заряд без підсилення), пропорційні лічильники (забезпечують газове підсилення при збереженні пропорційності між зарядом і енергією) та лічильники Гейгера–

Мюллера (лавинне розрядження по всьому об'єму, не несе енергетичної інформації). Газові детектори прості у виготовленні та добре підходять для реєстрації заряджених частинок і нейтронів, проте через малу щільність робочого середовища мають низьку ефективність взаємодії з гамма-квантами та обмежену енергетичну роздільну здатність.

Сцинтиляційні детектори засновані на властивості певних матеріалів – кристалічних, рідинних або газових – випромінювати фотони видимого або ультрафіолетового діапазону при взаємодії з іонізуючим випромінюванням. Спалах світла реєструється фотоелектронним помножувачем, який перетворює фотони на електричний імпульс, амплітуда якого пропорційна втраченій енергії частинки. Найпоширенішим неорганічним сцинтилятором для гамма-спектрометрії є NaI(Tl) – йодид натрію, активований талієм. Завдяки великому атомному номеру йоду і можливості виготовлення великих кристалів він забезпечує високу ефективність реєстрації гамма-квантів. Однак енергетична роздільна здатність NaI(Tl)-детектора становить приблизно 7% FWHM (повна ширина піку на половині максимуму) на лінії 661.6 keV (^{137}Cs).

Напівпровідникові детектори діють за принципом твердотільної іонізаційної камери: іонізуюче випромінювання, проходячи через збіднений шар р-п-переходу, створює електронно-діркові пари, кількість яких пропорційна поглиненій енергії. Завдяки значно меншій енергії, необхідній для утворення однієї пари (~ 3 eV у германії проти ~ 30 eV у газових детекторах), одиниця поглиненої енергії генерує в десятки разів більше носіїв заряду – це безпосередньо визначає вищу статистичну точність і краще енергетичне розрізнення. Для детектування гамма-випромінювання найчастіше застосовуються кремнієві (Si) детектори (переважно для м'якого випромінювання і рентгенівського діапазону) та германієві (Ge) детектори. Важливою відмінністю напівпровідникових детекторів є необхідність охолодження кристала для зниження теплових шумів і власної провідності, що стало б джерелом хибних сигналів за кімнатної температури.

Роздільна здатність напівпровідникових детекторів може перевищувати аналогічний показник сцинтиляційних у 30–50 разів, що є ключовою перевагою при ідентифікації близько розташованих гамма-ліній у складних спектрах. Саме тому в даній роботі розглядається саме детектор напівпровідникового типу, а саме HPGe (високочистий германій).

1.3 Принцип отримання та обробки електричного сигналу

Як зазначалось в попередньому розділі, в основі роботи детекторів іонізуючого випромінювання лежать процеси іонізації та/або збудження речовини чутливого об'єму детектора. Таким чином відбувається перетворення енергії E в вимірюваний сигнал (напругу або струм), який потім підсилюється та підраховується електронним пристроєм.

Електричні сигнали, що генеруються в детекторі, передаються на попередній підсилювач, розташований у безпосередній близькості від детектора, щоб обмежити втрати та електронний шум. Попередній підсилювач формує сигнал і відправляє його на оброблювальну електроніку, яка підсилює, оцифровує та записує його, що дозволяє ідентифікувати енергетичний спектр випромінювання, оцінити інтенсивність потоку частинок та розрахувати спектрометричні характеристики.

Послідовність обробки сигналу можна представити наступним чином:
детектор → попередній підсилювач заряду → формування сигналу → оцифрування → спектрометрична обробка.

1.4 Роздільна здатність детектора

Для подальшого аналізу спектрометрична інформація піддається цифровій амплітудній обробці, під час якої весь робочий енергетичний діапазон розбивається на дискретні інтервали – канали (або біни). Кожен канал відповідає строго визначеному кроку за енергією. При реєстрації гамма-кванта система визначає, якому амплітудному інтервалу відповідає сформований сигнал, і збільшує значення відповідного каналу на одиницю. У результаті

такого накопичення формується експериментальна гістограма, де по осі абсцис відкладаються номери каналів (або шкала енергії), а по осі ординат – кількість зареєстрованих імпульсів.

Для чіткого розрізнення близьких піків у спектрі та точного визначення відповідних енергій важливим параметром є енергетична роздільна здатність детектора. Вона характеризує його здатність розділяти два гамма-кванти, близькі за енергією. Роздільна здатність зазвичай виражається шириною піку на половині його максимальної висоти (FWHM) і вимірюється в кеВ. Чим менше значення FWHM, тим краща роздільна здатність. Наприклад, детектори HPGe мають високу роздільну здатність (порядку 1–2 кеВ при енергії 1.33 МеВ для лінії ^{60}Co), що дозволяє точно розрізняти піки навіть при складному спектрі.

Роздільна здатність (R) визначається як:

$$\frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

де:

- E – енергія фотоелектричного піку, кеВ;
- ΔE – ширина піку на пів висоті, тобто ширина піку на 50 % його максимальної амплітуди, кеВ.

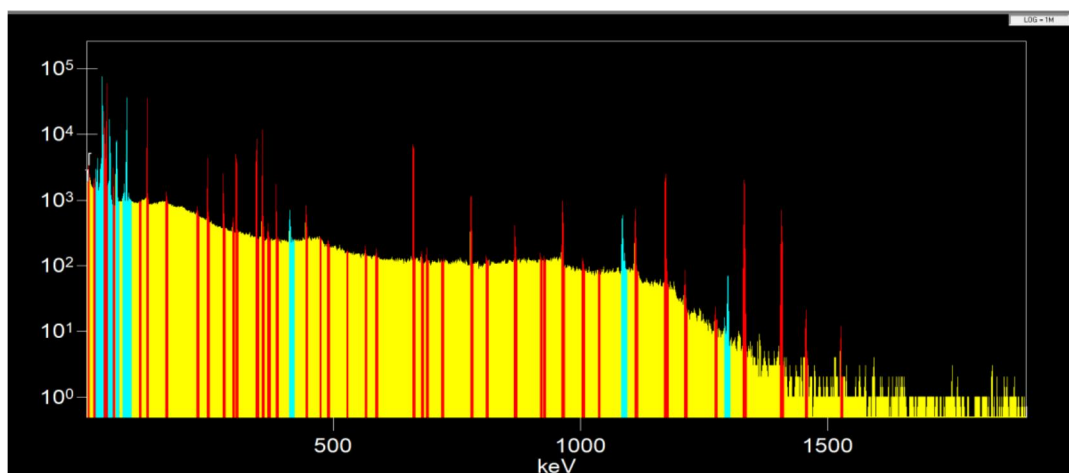


Рис. 1.1. Приклад гамма спектра

На Рис. 1.1 представлено приклад гамма-спектру та визначення областей інтересу (червоним і синім кольорами). Червоним позначено

ізолювані синглети – фотопіки, які добре відокремлені від інших піків і фонового шуму. Синім кольором позначено складні мультиплети – групи спектральних ліній із близькими енергіями, сумарна гаусова форма яких викривлена внаслідок взаємного перекриття й потребує застосування процедур математичного розділення.

1.5 Калібрування детектора за енергією

Для визначення точного співвідношення між номером каналу та відповідним значенням енергії гамма-кванта, що йому відповідає, проводиться енергетичне калібрування спектрометричної системи за допомогою еталонних джерел, енергія випромінювання яких відома. Це співвідношення, як правило, наближається до лінійності і може бути описане рівнянням:

$$E_N = a * N + b \quad (2)$$

де

- E_N – енергія, кеВ;
- N – номер каналу;
- a та b – параметри калібрування.

Приклад кривої калібрування за енергією наведено на Рис. .

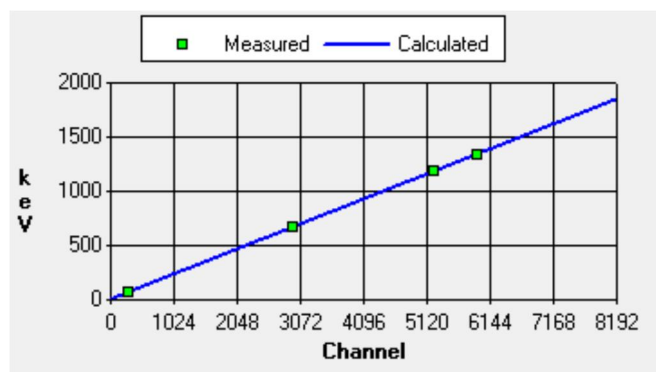


Рис. 1.2. Крива калібрування енергії для детектора HPGe

Таким чином, розподіл за бінами дозволяє отримати інформацію про спектральний склад випромінювання, а знання калібрувального

співвідношення дозволяє пов'язати зареєстровані піки спектра з енергетичними переходами, характерними для радіонуклідів, що досліджуються.

1.6 Вимірювання радіоактивності за допомогою гамма-детектора

Кількість гамма-квантів певної енергії, виміряних у спектрі, безпосередньо пов'язана з радіоактивністю (активністю) нукліду, проте цей зв'язок не є прямо пропорційним: між ними існує кількісний взаємозв'язок, який залежить від ряду факторів. При розпаді нестабільного ядра збудження може зніматися різними шляхами, тому конкретний гамма-квант випромінюється лише у певній частині актів розпаду (Рис.). Ця ймовірність є табличною характеристикою нукліда і називається коефіцієнтом розгалуження або абсолютною інтенсивністю гамма-лінії (наприклад, 85.1% для лінії 661.7 кеВ у ^{137}Cs , як показано на Рис.).

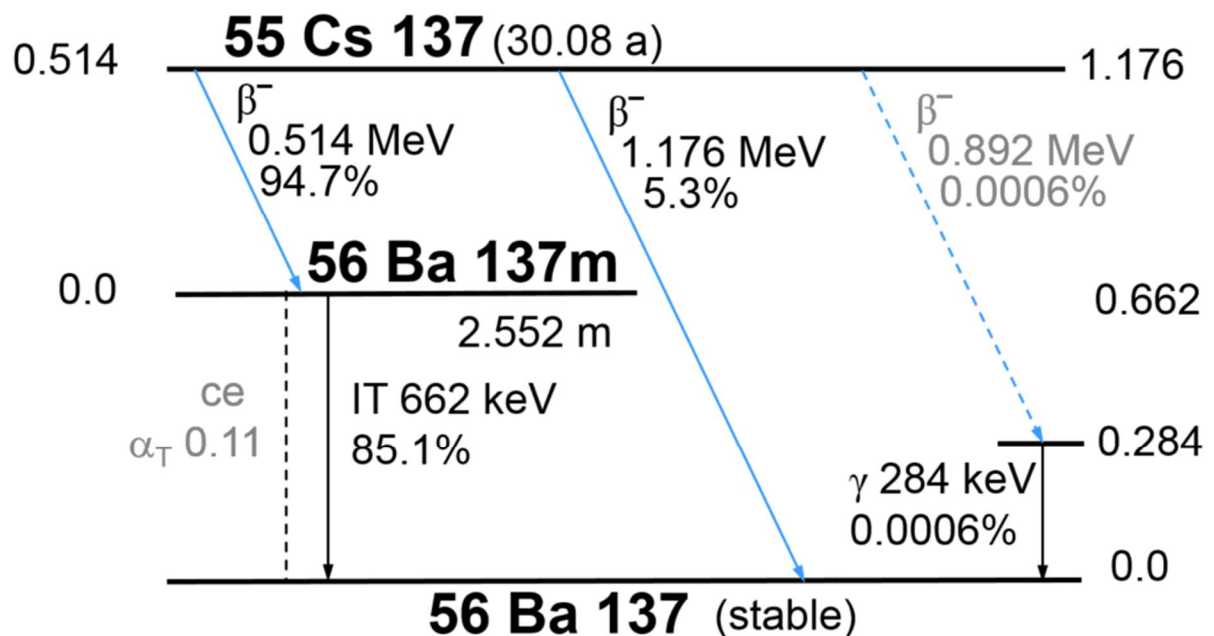


Рис. 1.3. Схема розпаду Цезія-137

В ідеальному випадку (реєстрація гама-кванта дуже великим детектором, що розташований перед джерелом випромінювання) кількість імпульсів у фотоелектричному піку становить:

$$N_E = A * I_\gamma(E) * t \quad (3)$$

де:

- N_E – кількість імпульсів у фотоелектричному піку енергії E , імпульси;
- A – активність вимірюваного радіонукліду, яка повинна бути однаковою для всіх вимірюваних енергій, Бк;
- I_γ – коефіцієнт розгалуження, який представляє ймовірність випромінювання шляхом розпаду, 1;
- t – час вимірювання, с.

Проте на практиці лише частина випромінюваних гама квантів досягає чутливого об'єму детектора, і не кожен із них реєструється у фотопіку. Тому у реальних умовах вводиться коефіцієнт абсолютної ефективності $\varepsilon(E)$, який є функцією енергії та визначається двома основними складовими:

- функції передачі, що складається з декількох факторів, таких як: енергія гама-кванта, геометрія вимірювання, відстань до джерела ($FT(E)$);
- внутрішньої ефективності, яка представляє характеристику самого детектора зареєструвати гама квант певної енергії (KE або $K(E)$).

Математично абсолютна ефективність реєстрації $\varepsilon(E)$ описується як добуток цих двох функцій:

$$\varepsilon(E) = FT(E) * K(E) \quad (4)$$

Остаточна формула має такий вигляд:

$$N_E = A * I_\gamma(E) * \varepsilon(E) * t \quad (5)$$

де:

- N_E – кількість імпульсів у фотоелектричному піку енергії E , імпульси;
- A – активність вимірюваного радіонукліду, Бк;
- $I_\gamma(E)$ – коефіцієнт розгалуження, 1;
- $\varepsilon(E)$ – абсолютна ефективність виявлення, 1;

- t – час вимірювання, с.

На основі цього можна виразити активність:

$$A(E) = \frac{N(E)}{I_\gamma(E) \cdot \varepsilon(E) \cdot t} \quad (6)$$

Таким чином, вимірюючи площу під піком (тобто кількість зареєстрованих гамма-квантів певної енергії) і знаючи інтенсивність переходу, ефективність реєстрації та час вимірювання, можна обчислити активність нукліду, що є джерелом випромінювання цього гама-кванта. Це є основою кількісного аналізу в гамма-спектрометрії.

1.7 Функція передачі

Функція передачі $FT(E)$ є фундаментальним поняттям в аналізі динамічних систем, будь то механічних, електричних або фізичних, як у ядерній метрології. У загальному випадку вона встановлює математичну залежність між вхідними і вихідними даними системи, що не змінюються з часом.

У контексті ядерних вимірювань функція передачі описує відгук усього реєструвального комплексу (детектора, електроніки, обробки сигналу) на фізичну величину, пов'язану з радіоактивністю, таку як потік частинок (гамма-квантів, нейтронів), потужність дози або енергія, що накопичується в детекторі.

Для вимірювань гамма-випромінювання функція передачі може бути описана як добуток двох факторів:

$$FT(E_\gamma) = \varepsilon_{GEO} \cdot P(E_\gamma) \quad (7)$$

де:

- ε_{GEO} – геометрична ефективність реєстрації, 1;
- $P(E_\gamma)$ – ймовірність повної реєстрації, включаючи ефект самопоглинання.

1.7.1 Ефект самопоглинання

Ефект самопоглинання описує ймовірність того, що гамма-квант зазнає взаємодії та втратить енергію всередині самого об'єкта дослідження, тобто не зможе вийти з речовини, яка оточує радіоактивне джерело. Іншими словами, це ймовірність того, що внаслідок процесів фотоелектричного поглинання або комптонівського розсіювання гамма-квант передасть всю або частину своєї енергії матеріалу зразка і не буде взагалі зареєстрований детектором або зареєстрований з іншою енергією. Це явище можна представити наступним чином:

$$P(E_\gamma) = 1 - \sum_i \mu_i(E_\gamma) * x_i \quad (8)$$

де :

- $\mu_i(E_\gamma)$ – коефіцієнт лінійного послаблення при проходженні одного шару електронів i , м^{-1} ;
- x_i – товщина шару електронів i , м .

Цей ефект виникає, коли енергія гамма-квантів недостатня для проходження крізь матерію, що унеможлиблює їх виявлення.

1.7.2 Геометрична ефективність

Гамма-кванти випромінюються радіоактивним джерелом ізотропно – у всіх напрямках повного кута (4π стерадіан). Однак поверхня детектора займає лише частину простору, в якій поширюються гамма-кванти. Відповідно, реєструється не весь потік гамма-квантів, а лише його частина. Ця частина пропорційна частці площі, яку займає поверхня детектора, відносно площі сфери, в якій випромінюються гамма-кванти.

У загальному випадку геометричний фактор системи визначається через тілесний кут Ω_0 реєстрації, який для точкового джерела, розташованого на центральній осі циліндричного детектора описується таким рівнянням:

$$\Omega_0 = \pi \left(\frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right)^2 \quad (9)$$

де:

- d – відстань між кристалом та радіоактивним джерелом, м;
- r – радіус поверхні детектування, м.

Застосувавши певні геометричні спрощення, ми можемо визначити геометричну ефективність реєстрації наступним чином:

$$\varepsilon_{GEO} = \frac{\Omega_0}{4\pi} = \frac{S}{4\pi d^2} \quad (10)$$

де:

- S – площа поверхні кристала у детекторі, навпроти якої розташовано вимірюване джерело, м²;
- d – відстань між кристалом та радіоактивним джерелом, м;
- 4π – повний просторовий кут, у якому випромінює однорідне радіоактивне точкове джерело, страд.

1.8 Внутрішня ефективність

Внутрішня ефективність (KE) гамма-детектора відповідає ймовірності того, що гамма-квант, який потрапляє на чутливу поверхню детектора, повністю передасть свою енергію речовині кристала й буде зареєстрований. Цей параметр відображає виключно внутрішні фізичні та спектрометричні властивості самого детектора (атомний номер матеріалу, густину, геометричні розміри кристала). Він характеризує ймовірність того, що поглинання енергії гама-кванта внаслідок поодинокого фотоефекту або каскаду послідовних комптонівських взаємодій з наступним утворенням характеристичного випромінювання призведе до формування сигналу повної амплітуди. Математично внутрішня ефективність визначається як відношення кількості зареєстрованих у піку імпульсів до загальної кількості квантів цієї ж енергії, що потрапили в чутливий об'єм:

$$KE(E_\gamma) = \frac{N(E_\gamma)}{N_0(E_\gamma)} \quad (11)$$

де:

- $N(E_\gamma)$ – кількість виміряних гамма-квантів енергії E_γ , імпульси;

- $N_0(E_\gamma)$ – кількість гамма-квантів енергії E_γ , що долітає до поверхні вимірювання, імпульси.

Внесок різних процесів у формування внутрішньої ефективності суттєво залежить від енергії випромінювання. При низьких енергіях у механізмах взаємодії абсолютно домінує фотоелектричний ефект. Із зростанням енергії ймовірність прямого фотоефекту падає, і фотопік формується переважно складними багатократними процесами, наприклад, послідовним комптонівським розсіюванням із наступним повним поглинанням вторинних розсіяних квантів у межах чутливого об'єму детектора.

РОЗДІЛ 2

МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ДЕТЕКТОРА HPGe

Другий розділ роботи присвячено обґрунтуванню та практичній реалізації комплексної методики калібрування спектрометричної системи на основі напівпровідникового детектора з надчистого германію. На початку розділу описано конструкційні особливості кристала й вакуумного кріостата, а також визначено експериментальні умови вимірювань. Далі детально описано послідовні етапи метрологічної атестації системи.

2.1 Будова детектора HPGe

Напівпровідниковий детектор на основі надчистого германію HPGe (Germanium High Purity) складається з монокристала германію високого ступеня очищення, який виконує роль чутливого об'єму для реєстрації гамма-випромінювання.

Коли гамма-квант взаємодіє з кристалом, він передає всю або частину своєї енергії електронам матеріалу. Ця взаємодія створює вільні електричні заряди (пари електрон – дірка), кількість яких є пропорційною поглинутій енергії. Ці заряди збираються завдяки внутрішньому електричному полю і перетворюються в електричні імпульси. Амплітуда кожного імпульсу безпосередньо пов'язана з енергією падаючого гама-кванта, що дозволяє встановити енергетичний спектр. Схематичну структуру HPGe-детектора та його основних функціональних вузлів представлено на Рис. 2.1..

Для якісної роботи HPGe-детектора його кристал охолоджують до температури рідкого азоту. Це необхідно для того, щоб суттєво знизити таке явище як тепловий шум (теплове утворення носіїв заряду). Через малу ширину забороненої зони германію теплове збудження за кімнатної температури викликає потужний темновий струм, який спотворює корисний спектрометричний сигнал.

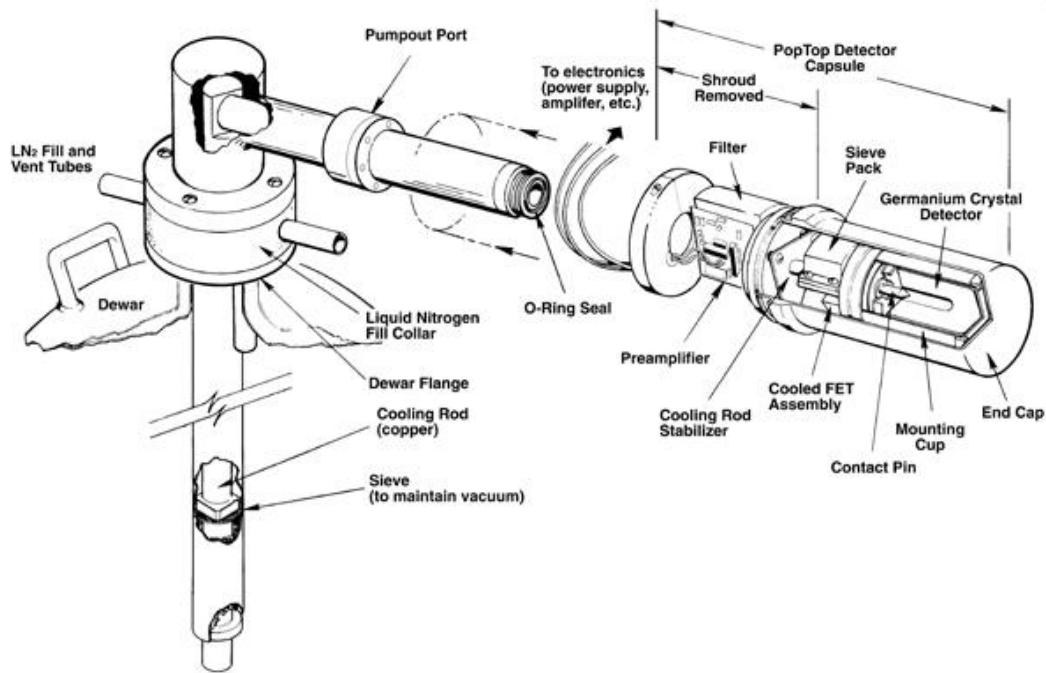


Рис. 2.1. Схема германієвого детектора (HPGe)

Кристал розміщують усередині герметичного вакуумного кріостата, який виконує роль теплоізолятора для підтримання стабільно низької температури, а також захищає чутливий елемент від атмосферної вологи та механічних пошкоджень. Кріостат містить тонке вікно із матеріалу з низьким атомним номером, що, з одного боку, дозволяє гамма-квантам досягати кристала, а з іншого, мінімізує поглинання низькоенергетичних гамма-квантів та рентгенівського випромінювання.

2.2 Метод визначення внутрішньої ефективності

Внутрішня ефективність є унікальною інструментальною характеристикою кожного детектора. Її експериментальне визначення ґрунтується на використанні набору еталонних джерел, гама-лінії яких охоплюють необхідний енергетичний діапазон. Для кожної гама-енергії E_γ , випроміненої певним радіонуклідом з відомою поточною активністю A , виконується математична обробка спектра для обчислення чистої площі під фотоелектричним піком $N E_\gamma$. Під час калібрування HPGe-детекторів істотний внесок у сумарну невизначеність результатів можуть давати ефекти

самопоглинання та підсумовування справжніх збігів (TCS), що вимагає введення відповідних розрахункових коефіцієнтів корекції при побудові фінальної кривої ефективності [3]. Такими коефіцієнтами є поправка на час вимірювання t та коефіцієнт розгалудження $I_\gamma E_\gamma$, фізичний сенс якого описано в РОЗДІЛ 1. Геометрія експерименту, як було вказано, описується через тілесний кут. Остаточна внутрішня ефективність виводиться з рівнянь 6 та 11:

$$KE(E_\gamma) = \frac{N E_\gamma}{A \varepsilon_{GEO} E_\gamma I_\gamma E_\gamma t} \quad (12)$$

де :

- $N E_\gamma$ – чиста площа фотоелектричного піка (кількість зареєстрованих імпульсів) для енергії E_γ , імпульси;
- A – поточна активність еталонного радіонукліда, Бк;
- $I_\gamma E_\gamma$ – коефіцієнт розгалуження (абсолютна інтенсивність) гамма-випромінювання для енергії E_γ , 1;
- $\varepsilon_{GEO} E_\gamma$ – геометрична ефективність реєстрації енергії E_γ , 1;
- t – час вимірювання (експозиція), с.

Саме ця формула була використана для визначення внутрішньої ефективності детектора під час аналізу результатів у цій роботі.

Слід зазначити, що окрім експериментального підходу, у сучасній практиці застосовуються напівемпіричні та модельні методи калібрування ефективності HPGe-детекторів [4]. Проте аналіз даних методів виходить за межі мети даного дослідження.

2.3. Обґрунтування спрощувальних припущень

Для зниження обчислювальної складності представленої математичної моделі без втрати точності кінцевого результату в метрологічній практиці застосовують низку базових фізичних припущень [5] таких як, наприклад, нехтування залишковим підкладковим фоном після процедури його

віднімання, нехтування впливом матеріалу вхідного вікна детектора на великих відстанях «джерело–детектор», а також нехтування ефектом самопоглинання для джерел малої товщини. У даній роботі було використано декілька таких підходів, що дозволили оптимізувати процес калібрування детектора. Розглянемо їх детальніше.

2.3.1 Вибір геометрії вимірювань

Найбільш вагомим спрощенням при проведенні експерименту є калібрування спектрометра в умовах так званої «дальньої геометрії». Щоб створити такі умови відстань між еталонним джерелом та вхідним вікном детектора d фіксувалася на відмітці, яка щонайменше у 10 разів перевищує радіус кристала детектора r . Виконання цієї умови дозволяє знехтувати просторовою протяжністю кристала, та розглядати пучок гамма-квантів як практично паралельний, а кут його падіння – близьким до нормалі. Тоді тілесний кут можна розрахувати за спрощеною формулою:

$$\Omega \approx \frac{S}{4\pi d^2} \quad d \gg r \quad (13)$$

Такий підхід повністю мінімізує необхідність введення складних просторових поправок на близькість розташування та нівелює ефекти бічного розсіювання квантів. Проте у випадках, коли це наближення є недійсним (наприклад, при вимірюваннях у ближній геометрії безпосередньо на кришці детектора), доводиться відмовлятися від даного припущення та застосовувати точну формулу 9.

2.3.2 Особливості застосування пасивного екранування

У штатних умовах експлуатації спектрометричний комплекс постійно оточений масивним свинцевим захисним кожухом. Це необхідно для максимального зменшення зовнішнього гамма-фону лабораторії, зумовленого космічним випромінюванням та природними радіонуклідами.

Проте, при проведенні вимірювань із визначення кутової ефективності детектора з цього правила робили виняток. Оскільки масивні стінки свинцевого кожуху перекривають траєкторії гамма-квантів, що падають на кристал під великими кутами відносно центральної осі, пасивне екранування частково або повністю демонтувалось відповідно до протоколу, зберігаючи при цьому вимоги безпеки та якості вимірювань.

2.4 Еталонні джерела

Для проведення прецизійного калібрування детекторів за енергією та ефективністю реєстрації традиційно використовують еталонні точкові джерела. У даній роботі ми використовували радіоактивні джерела, що охоплюють діапазон від 50 до 1500 кеВ. Перелік еталонних джерел та їх спектрометричні характеристики представлено в Таблиця 2.41. Такий вибір дозволив отримати чітко визначені лінії у всьому енергетичному діапазоні, що важливо для аналізу радіоактивності відходів. Діапазон енергій визначався на основі даних про радіоактивні елементи, які підлягають обов'язковій ідентифікації та кількісному контролю під час моніторингу й аналізу радіоактивних відходів.

Таблиця 2.41. Еталонні джерела, що використовувались в роботі

Радіонуклід	Дата вимірювання	Радіоактивність А (Бк)	Енергії γ (кеВ)
Co-60	19/12/2024	1.83E+06	1173.23; 1332.49
Ba-133	18/12/2024	3.95E+05	53.16; 80.99; 302.85; 356.01
Cs-137	18/12/2024	3.30E+06	661.61
Eu-152	18/12/2024	3.27E+05	121.78; 244.69; 344.27; 778.90; 1112.08; 1408.01

Радіонуклід	Дата вимірювання	Радіоактивність А (Бк)	Енергії γ (кеВ)
Am-241	18/12/2024	3.10E+05	59.54

Обраний інтервал дозволяє надійно реєструвати як низькоенергетичні лінії, так і реперні лінії найбільш поширених техногенних продуктів поділу та активації.

2.5 Процедура калібрування

2.5.1 Калібрування за енергією

Калібрування шкали «канал – енергія» дозволяє встановити точну відповідність між номером каналу, створеним електронікою спектрометра, і реальною енергією зареєстрованих гамма-квантів. Це обов’язкова процедура перед початком будь-яких гама-спектрометричних вимірювань або калібрувань, оскільки точність ідентифікації радіонуклідів безпосередньо залежить від стабільності цієї шкали. Для виконання цього етапу ми використовували добре відомі еталонні джерела, а саме Am-241, Cs-137 і Co-60 (Таблиця 2.41). Обрані радіонукліди мають характерні гамма-лінії, відповідно при низькій (59.54 кеВ), середній (661.66 кеВ) і високих енергіях (1173.23 кеВ і 1332.49 кеВ), що забезпечує охоплення всього обраного діапазону енергій.

Під час калібрування ми послідовно розміщували кожне еталонне джерело на фіксованій відстані перед входним вікном детектора. Час експозиції вимірювання підбирався таким чином (зазвичай близько 60 секунд для високоінтенсивних джерел), щоб забезпечити невизначеність площі фотопіків, 5%. Після цього за допомогою програмного забезпечення спектрометра виконувалося визначення координат максимумів відповідних фотопіків. Ці значення потім зіставлялись з відомими енергіями ліній випромінювання за допомогою бібліотеки радіонуклідів для створення набору точок

калібрування. Практика гамма-спектрометрії показує, що для побудови надійної енергетичної шкали в межах обраного діапазону цілком достатньо чотирьох реперних значень. Зв'язок між шкалою каналів та фізичними енергіями гамма-квантів у даній роботі моделювався за допомогою лінійної функції першого порядку $E_N = a * N + b$. Отримана залежність потім застосовувалась до всіх вимірних спектрів для перетворення каналів у значення енергії.

2.5.2 Визначення внутрішньої ефективності реєстрації

Як вже згадувалось в РОЗДІЛ 1, внутрішня ефективність детектора HPGe – це його фундаментальна інструментальна характеристика, параметр, який безпосередньо пов'язує площу експериментального фотопіку (кількість зареєстрованих імпульсів) зі щільністю потоку гамма-квантів, що падають на чутливий об'єм кристала. Визначення цієї функції є необхідним етапом для калібрування кожного детектора, оскільки саме вона обумовлює надійність усіх подальших вимірювань ядерних відходів. Знаючи криву ефективності, можна перетворити експериментальний спектр на кількісну оцінку активності, а отже, гарантувати метрологічне відстеження, необхідне для направлення відходів до відповідного місця зберігання.

Ми проводили калібрування в еталонній геометрії, яка забезпечувала умову «дальньої геометрії». Джерело розміщували строго по центру відносно поздовжньої осі симетрії детектора, іноді з використанням опори для забезпечення вирівнювання. Використовувались еталонні джерела, перераховані в Таблиця 2.41. При накопиченні спектра для кожного аналітичного фотопіка експозиція підрахунку тривала до отримання щонайменше 10000 чистих імпульсів, так що статистична невизначеність щодо площі піку залишається меншою за 1 %. Фоновий шум вимірювали окремо і віднімали від сумарного сигналу. Внутрішню ефективність $KE(E_\gamma)$ для кожної дискретної енергії розраховували на основі раніше обґрунтованого

рівняння 12. Описана процедура гарантувала, що отримані значення є надійними та можуть порівнюватись з результатами інших лабораторій.

2.5.3 Тест мертвого часу

Тест мертвого часу (або час відгуку системи реєстрації) має на меті кількісно оцінити втрати аналітичних імпульсів при високих завантаженнях спектрометричного тракту. Мертвий час відповідає інтервалу, протягом якого детектор і його оброблювальна електроніка зайняті аналізом події і не можуть фізично реєструвати нові імпульси. Чим вищою є інтенсивність потоку гамма-квантів, тим більше зростає частка мертвого часу, що призводить до втрати підрахунку імпульсів, якщо в системі не реалізовано жодної корекції.

На Рис. проілюстровано описане явище, коли подію А не можна записати електронікою, оскільки мертвий час, що виник внаслідок події В, не закінчився. Тест мертвого часу є важливим для забезпечення надійності вимірювань під час аналізу радіоактивних відходів.

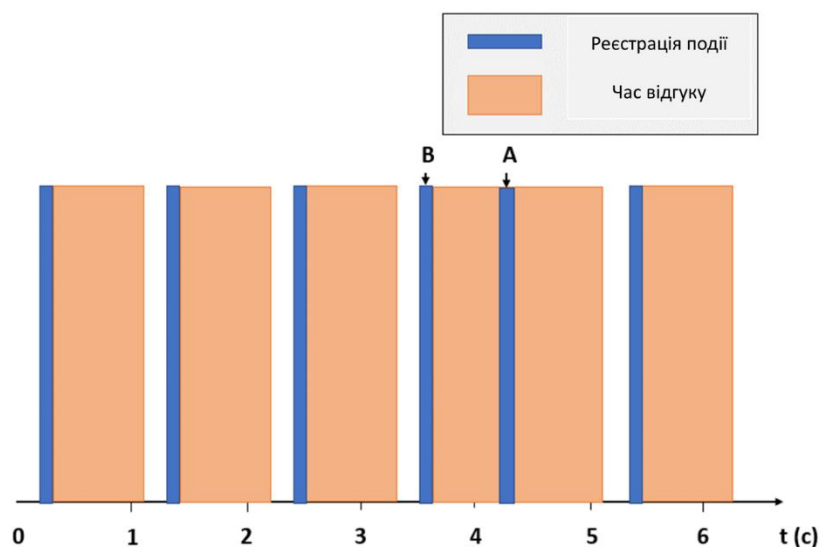


Рис. 2.2 Ілюстрація мертвого часу після реєстрації події

Активність зразків радіоактивних відходів може сильно варіюватися: деякі з них мають низький потік гамма-квантів, тоді як інші, зокрема відходи середньої та високої радіоактивності, можуть генерувати дуже високий рівень

гама-випромінювання, створюючи екстремальні завантаження спектрометричного тракту. Коли падаючий потік перевищує швидкість обробки детектора та його електроніки, частина подій не реєструється через час відгуку, що призводить до заниження або завищення реальної активності.

Проведення тесту мертвого часу дозволяє розширити діапазон використання детектора у бік високих активностей і гарантувати, що скориговані результати точно відображають реальну активність відходів, що аналізуються незалежно від їхніх характеристик випромінювання.

Експеримент із дослідження мертвого часу реалізовувався за двокомпонентною методикою. Три джерела (два джерела ^{152}Eu та одне джерело ^{133}Ba) використовувались для створення фону перешкод. Вони послідовно розміщувалися на одній лінії навпроти детектора. На кожному новому етапі експерименту джерела наближали до вхідного вікна кріостата, що дозволяло штучно збільшувати завантаження системи та нарощувати частку мертвого часу з кроком приблизно на десять відсотків на кожному етапі.

Три інших джерела ^{241}Am , ^{137}Cs і ^{60}Co використовувались як реперні. Вони були розміщені на лінії, суміжній з тією, на якій розташовувались джерела перешкод і залишались нерухомими протягом усіх етапів випробування. Це дозволило відстежувати, як зміна загального завантаження впливає на збереження чистої площі та форми фотопіків нерухомих еталонів.

Схематичне зображення геометрії експерименту представлена на Рис. 2.5 Для кожної конфігурації було проведено від п'яти до десяти вимірювань однакової тривалості. Це дозволило паралельно з оцінкою втрат провести дослідження часової стабільності роботи електронних компонентів при тривалих послідовних вимірюваннях. Хоча стандартна процедура калібрування не передбачає багаторазових повторень, тривала інструментальна експлуатація за умов екстремальних завантажень може викликати прихований дрейф параметрів електроніки, що безпосередньо впливає на відтворюваність результатів.

Залежно від обраної геометричної конфігурації та відстані до завадових джерел, виміряна частка мертвого часу системи варіювалася в широких межах: від 5 до 65 %.

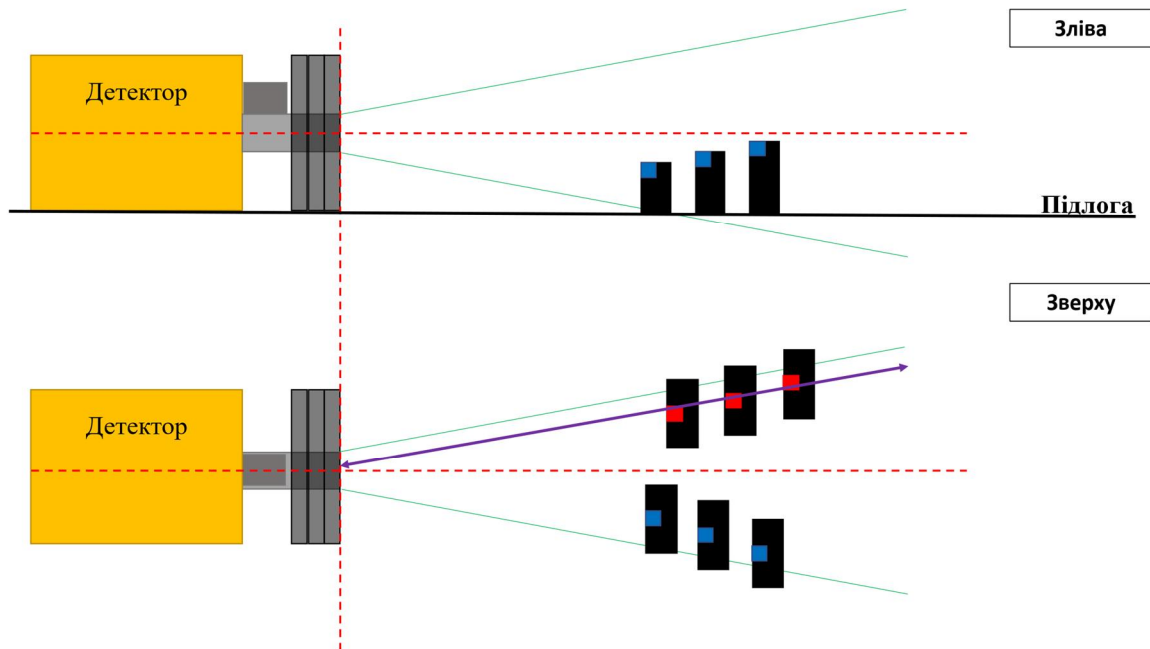


Рис. 2.53 Схематичне зображення конфігурації установки для тесту часу відгуку (відстежуванні джерела відображено синім, джерела перешкоди - червоним)

2.5.4 Тест кутової ефективності

Метою цього дослідження було експериментальне визначення зміни відгуку HPGe-детектора залежно від кута падіння гамма-випромінювання на вхідне вікно кріостата. При вимірюванні ядерних відходів геометрія опромінення не завжди є ідеально фронтальною: форма контейнера, внутрішній розподіл радіоактивних матеріалів або положення детектора можуть спричинити різні кути падіння гама-квантів. Окремі дослідження відзначають значний вплив просторового спрямування потоку гамма випромінювання на здатність детектора розрізняти окремі частинки та їхню енергію [6].

Як і у випадку досліджень з визначенням внутрішньої ефективності, вимірювання проводилися з використанням декількох еталонних джерел (^{241}Am , ^{137}Cs і ^{60}Co), але з додаванням додаткової змінної: кута. Положення еталонних джерел відносно геометричної осі детектора змінювалося таким чином, щоб охопити кути від 0° до 180° відносно нормалі до поверхні детектора (90° відповідає фронтальному падінню). Кінцевою метою експерименту була кількісна оцінка залежності швидкості рахунку у фотопіках повного поглинання від косинуса кута падіння гамма-випромінювання. Схематичне зображення експериментальної установки наведено на Рис. 2.5

Результати обробки накопичених спектрів виражалися у вигляді відносної кутової ефективності, яка визначалась як відношення кількості імпульсів, виміряних під певним кутом, до кількості імпульсів, отриманих під кутом 90° .

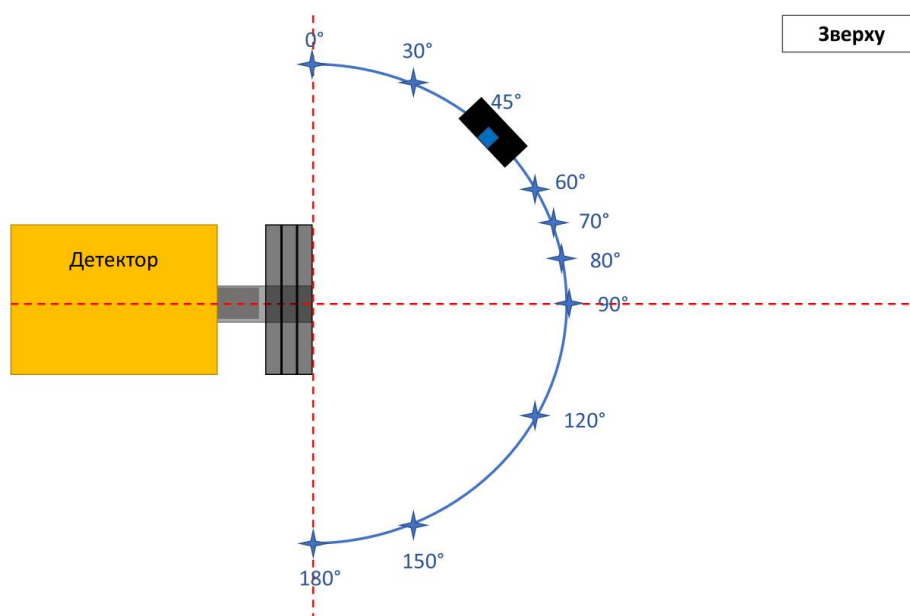


Рис. 2.5 Ілюстрація конфігурації установки для тесту кутової ефективності

Такий спосіб представлення даних дозволяє нормувати результати, нівелювати вплив поточної активності конкретного нукліда і проводити пряме порівняння кутової анізотропії детектора для різних енергетичних ліній.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У даному розділі представлено аналіз експериментальних результатів, отриманих під час метрологічної атестації HPGe-детектора. На основі отриманих результатів побудовано криву ефективності реєстрації детектора, визначено критичні межі завантаження спектрометричного тракту в умовах екстремального мертвого часу та вплив кута падіння гамма-квантів на ефективність реєстрації випромінювання. Отримані узагальнені закономірності забезпечують необхідну точність і надійність вимірювань при подальшому аналізі радіоактивних відходів складної геометрії.

3.1 Аналіз даних та автоматизація аналізу

Гамма-спектрометричні дослідження високої роздільної здатності характеризуються великим обсягом первинної інформації. Складність аналітичного етапу суттєво зростає при переході від рутинного експрес-аналізу до комплексного метрологічного калібрування спектрометра.

Оскільки для забезпечення статистичної достовірності результатів кожен тест вимагає багаторазових послідовних вимірювань, сумарний масив даних швидко розростається. Традиційний ручний аналіз таких масивів не лише знижує ефективність роботи, а й збільшує ймовірність внесення випадкових помилок при копіюванні числових даних із текстових звітів. У зв'язку з цим, першим етапом представлених у цьому розділі експериментальних досліджень стала розробка та впровадження алгоритмів автоматизації збору й обробки даних, що дозволило забезпечити метрологічну точність на усіх етапах обробки та аналізу результатів – від первинного спектра до фінальних калібрувальних кривих.

3.1.1 Аналіз спектрів із тестів мертвого часу та кутової ефективності

Під час тестів мертвого часу та кутової ефективності було отримано більш ніж двісті спектрів, що суттєво ускладнювало ефективність ручної обробки даних.

В стандартному алгоритмі обробки кожного спектра треба було виконати певні рутинні операції, такі як: визначення енергії та площі реперних фотопіків, перенесення отриманих даних в таблицю Excel, яка використовувалась для візуалізації результатів вимірювання. Ця процедура, зокрема пошук даних у звітах про аналіз, наданих програмним забезпеченням, була найважчою частиною, оскільки потребувала найбільше часу і була джерелом повторюваних помилок.

Щоб вирішити цю проблему, було розроблено два скрипти на мові програмування Python. Перший дозволяв для кожного спектра автоматично знаходити час відгуку та інтенсивність (площу) фотопіків, що нас цікавили, а потім генерувати CSV-файл, який можна було безпосередньо використовувати. Другий аналізував кутові вимірювання та створював таблицю інтенсивності фотопіків за кутом та радіонуклідом, яка також експортувалася у форматі CSV.

Ця автоматизація дозволила скоротити час обробки з декількох годин до декількох хвилин, гарантуючи при цьому узгодженість і простежуваність даних. Крім того, ці скрипти будуть у подальшому використовуватися для калібрування майбутніх детекторів. Використані скрипти наведені в Додаток 1 для тестування часу відгуку і в Додаток 2 для тестування кутової ефективності.

3.1.2 Аналіз флуктуацій фоновому шуму

Під час аналізу спектрів реальних радіоактивних відходів обов'язковою метрологічною процедурою є коректне віднімання спектра зовнішнього фону.

Проте на практиці простої операції математичного віднімання не завжди достатньо: через статистичну природу розпаду та варіації умов вимірювання,

незначні піки природних або техногенних радіонуклідів, присутніх у фоні, все одно можуть з'являтися у фінальному спектрі, впливаючи на точність визначення активності відходу. Як доповнення до основної теми дослідження, я працювала над аналізом флуктуацій фоновому шуму, щоб оцінити його стабільність та вплив на результати вимірювань.

Проблематика аналізу великої кількості спектрів для аналізу та створення повної статистики мала такі самі причини, що і аналіз спектрів випробувань мертвого часу та кутової ефективності. Щоб вирішити цю проблему та систематизувати аналіз фону, було розроблено спеціальний скрипт на мові Python. Його головним завданням стала повна автоматизація всього циклу обробки.

Алгоритм роботи скрипта побудовано наступним чином:

1. Автоматичний запуск аналізу. Скрипт самостійно знаходить усі вихідні спектри у вказаній директорії та через командний рядок ініціює для них стандартизовану послідовність аналізу, генеруючи текстові звіти. Для оптимізації процесу програма перевіряє наявність уже створених звітів, а після успішного копіювання файлів до робочої папки – видаляє оригінали з тимчасової директорії програмного забезпечення, уникаючи засмічення пам'яті.
2. Вилучення даних. За допомогою регулярних виразів код автоматично сканує кожен звіт, розпізнає рядки з енергіями та вилучає відповідні значення кількості імпульсів для визначених радіонуклідів, враховуючи допустиму похибку калібрування (енергетичну толерантність).
3. Статистична оцінка та візуалізація. Отримані дані збираються у єдину структуру. Для кожної енергії скрипт будує гістограму розподілу кількості імпульсів, яка наочно демонструє частоту появи певних значень у фоні. На гістограми автоматично наносяться лінії середнього значення (μ) та стандартного відхилення (σ).
4. Контроль аномалій. Окрім візуалізації, у код додано умову автоматичного пошуку статистичних аномалій: якщо кількість імпульсів

у певному спектрі перевищує поріг $\mu + \sigma$, скрипт виводить точну дату вимірювання (зчитану з назви файлу), енергію та аномальне значення для подальшого аналізу технічних причин збою.

Розроблений інструмент є універсальним і зможе використовуватися в подальшому для контролю стабільності фону всіх використовуваних детекторних систем. Використаний скрипт наведено в Додаток 3.

3.2 Аналіз результатів

Оцінка продуктивності детектора HPGe проводилася за трьома напрямками: визначення внутрішньої ефективності, характеристика мертвого часу та вимірювання кутової ефективності. Сукупність цих результатів дає повну картину роботи детектора в умовах, що є репрезентативними для вимірювань радіоактивних відходів.

3.2.1 Результат тесту внутрішньої ефективності

Для розрахунку внутрішньої ефективності ми використовували значення площ фотопіків характерних гамма-ліній еталонних джерел, які були автоматично вилучені зі звітів розробленим програмним скриптом. Для отримання метрологічно достовірних результатів отримані значення підлягали обов'язковому аналітичному коригуванню. Зокрема, алгоритм враховував коефіцієнт розгалуження кожної конкретної гамма-лінії, а також здійснював автоматичний перерахунок абсолютної активності кожного джерела на точну дату й час проведення вимірювань. Отриманий після такої обробки масив дискретних точок ефективності (Таблиця 3.21) для всього досліджуваного енергетичного діапазону став основою для побудови фінальної калібрувальної кривої детектора (Рис. 3.2.1).

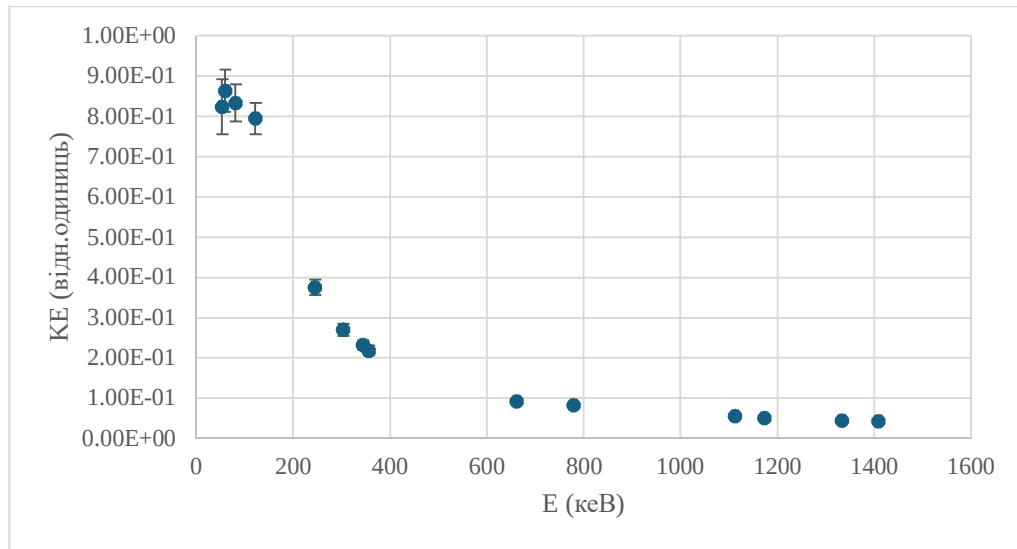


Рис. 3.2.1 Крива внутрішньої ефективності детектора

Результати (Рис. 3.2.1 та Таблиця 3.21), показують загальну тенденцію до зниження ефективності зі збільшенням енергії гамма-квантів.

Невизначеність розраховувалась із застосуванням рівняння 12 за формулою:

$$\sigma_{KE} = \sqrt{\frac{1}{A \varepsilon_{GEO} I_{\gamma} t}^2 \sigma_N^2 + \frac{N}{A^2 \varepsilon_{GEO} I_{\gamma} t}^2 \sigma_A^2 + \frac{N}{A \varepsilon_{GEO}^2 I_{\gamma} t}^2 \sigma_{\varepsilon_{GEO}}^2 + \frac{N}{A \varepsilon_{GEO} I_{\gamma}^2 t}^2 \sigma_{I_{\gamma}}^2 + \frac{N}{A \varepsilon_{GEO} I_{\gamma} t^2}^2 \sigma_t^2} \quad (14)$$

де :

- σ_N – похибка площі піку; визначається для кожного піку програмним забезпеченням спектрометра, імпульси;
- σ_A – похибка активності радіоактивного еталонного джерела згідно зі значенням у сертифікаті калібрування джерела, Бк;
- $\sigma_{I_{\gamma}}$ – похибка коефіцієнта розгалудження; знаходиться в базі ядерних даних LNHB, 1; [7]
- σ_t – похибка часу активного збору даних, с;
- $\sigma_{\varepsilon_{GEO}}$ – невизначеність геометричної ефективності (визначається рівнянням 13); залежить від невизначеності відстані між кристалом і джерелом (σ_d), а також від невизначеності площі кристала (σ_S) наступним чином:

$$\sigma_{\varepsilon_{GEO}} = \sqrt{\frac{1}{4\pi d^2}^2 \sigma_S^2 + \frac{S}{8\pi d^3}^2 \sigma_d^2} \quad (15)$$

Таблиця 3.21 Результати тесту визначення внутрішньої ефективності
детектора

Радіонуклід	Енергія (кеВ)	КЕ (1)	$\sigma_{KE} \ 1$	Коментар
Ba-133	53.16	0.824	0.068	Висока ймовірність фотоелектричного ефекту → висока ефективність.
Am-241	59.54	0.863	0.053	Висока ймовірність фотоелектричного ефекту → висока ефективність.
Ba-133	302.85	0.270	0.015	Поступове зменшення ефективності зі збільшенням енергії гамма-квантів.
Ba-133	356.01	0.219	0.012	Поступове зменшення ефективності зі збільшенням енергії гамма-квантів.
Cs-137	661.61	0.092	0.006	Домінуючий ефект Комптона, тривале зменшення ефективності.
Eu-152	778.90	0.083	0.004	Домінуючий ефект Комптона, тривале зменшення ефективності.
Co-60	1173.20	0.0518	0.0036	Проходження без повної віддачі більш ймовірні; домінує ефект Комптона.
Eu-152	1408.00	0.0433	0.0022	Проходження без повної віддачі більш ймовірні; домінує ефект Комптона.

Аналіз графіка з Рис. 3.2.1 свідчить, що крива ефективності має високе плато при низькій енергії, рівномірне зниження при середніх енергіях і поступове падіння при високих енергіях, що відповідає очікуваній фізичній поведінці.

3.2.2 Результат тесту мертвого часу

Результати тестів часу відгуку представлені на

Рис. 3.2.2.

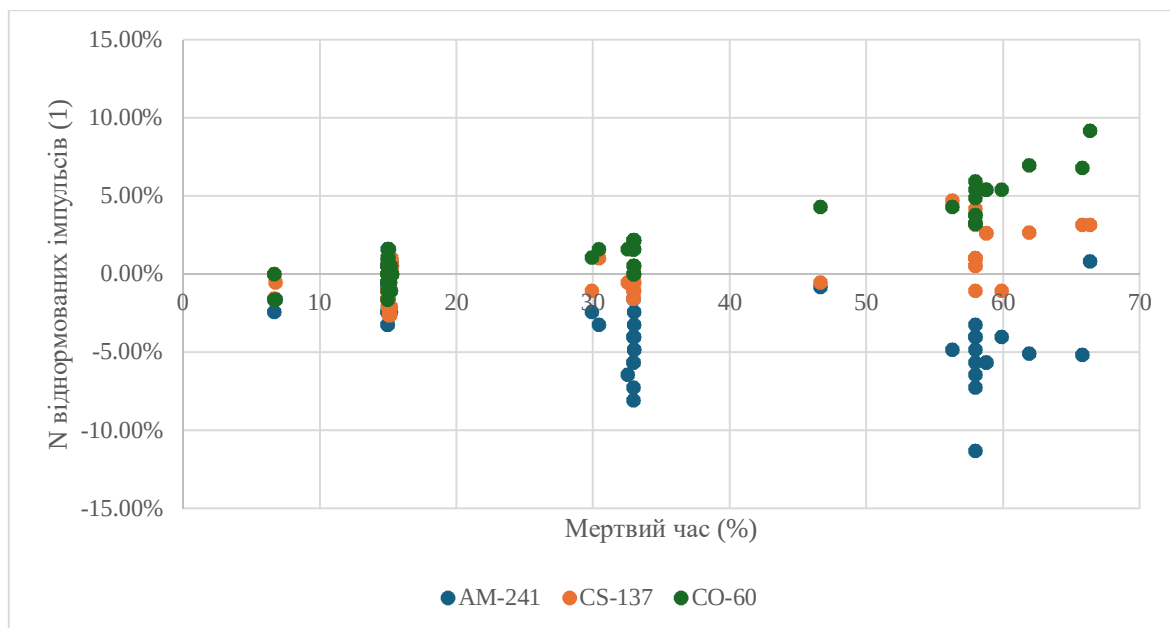


Рис. 3.2.2. Результати тесту мертвого часу

Тест мертвого часу необхідний для того, щоб оцінити вплив збільшення потоку гама-квантів на здатність детектора реєструвати всі події. Еталонна конфігурація (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am) дала мертвий час близько 6.6 %. При цьому відхилення значень площ фотопіків між послідовними циклами в межах однієї серії були мінімальними. Додавання джерела-перешкоди (^{152}Eu) збільшило мертвий час приблизно до 15 %, без значних втрат: відхилення, як правило, залишаються в межах від -3% до $+1\%$. З двома однаковими джерелами-перешкодами ($^{152}\text{Eu} + ^{152}\text{Eu}$) мертвий час досяг приблизно 33 %, що призвело до значних втрат при низьких енергіях (від -4% до -8%) і незначного впливу на результати на високих енергіях. У найбільш екстремальних конфігураціях (одночасно ^{133}Ba і кілька ^{152}Eu) мертвий час перевищив 58-66 % з втратами до -11.3% при 59.5 кеВ.

Ці результати показують, що детектор зберігає точність і не потребує введення додаткових математичних поправок за умов, коли інтегральний мертвий час системи не перевищує поріг у 15-20 %. При аналізі реальних контейнерів з радіоактивними відходами середнього та високого рівнів активності, де цей поріг буде перевищено, звичайне вимірювання без

урахування виявленого ефекту призведе до значного зниження питомої активності.

3.2.3 Результати вимірювання кутової ефективності

Експериментальне дослідження кутового відгуку HPGe-детектора (геометрія станда наведена на Рис. 2.5) дозволило кількісно оцінити анізотропію ефективності реєстрації випромінювання. На Рис. 3.2.2 представлено результати дослідження з яких видно, що ефективність реєстрації гама-квантів детектором сильно змінюється залежно від кута падіння та енергії гама-квантів. Як видно з Рис. 3.2.2, графік демонструє високий ступінь симетрії результатів між передніми ($0^\circ - 90^\circ$) та задніми ($90^\circ - 180^\circ$) кутами. Цей факт підтверджує просторову однорідність чутливого об'єму кристала, його центральне розміщення всередині вакуумного кріостата, а також відсутність значних локальних дефектів або неоднорідностей.

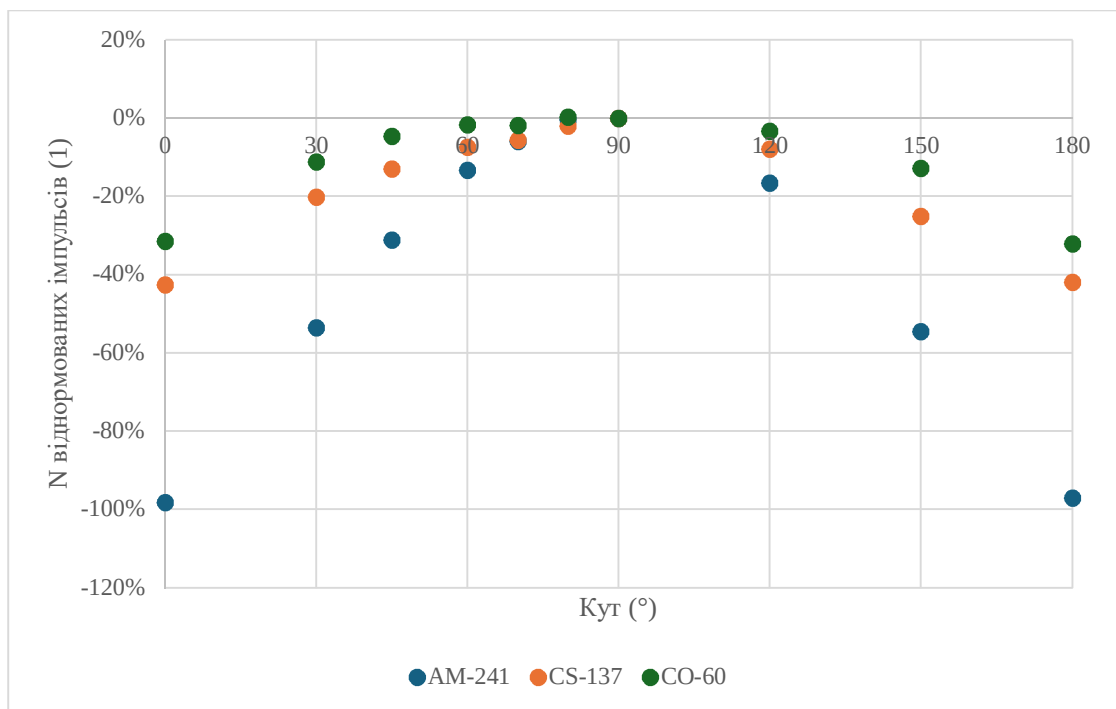


Рис. 3.2.2 Результати тесту кутової ефективності

Вплив кута падіння гамма-квантів на ефективність реєстрації виявився нерівномірним по спектру і продемонстрував чітку залежність від енергії випромінювання. В низькоенергетичній області (^{241}Am) вплив кута є

критичним. При відхиленні від нормального (фронтального) падіння спостерігається різке падіння швидкості рахунку у фотопіку. Вплив кута в середній області енергій (^{137}Cs) можна описати як помірний, де значення швидкості рахунку у фотопіку незначно і плавно зменшуються з відхиленням кута реєстрації від 90° . У високоенергетичній області (^{60}Co) вплив просторового кута падіння пучка на ефективність реєстрації гама-квантів є мінімальним.

Отримані результати мають критичне значення для практичної гамма-спектрометрії реальних контейнерів із радіоактивними відходами. Оскільки розподіл нуклідів всередині контейнера є невідомим і може бути випадковим та нерівномірним, визначення питомої активності низькоенергетичних ізотопів без урахування кутової ефективності детектора призведе до суттєвих похибок вимірювання активності. Для уникнення цього ефекту вимірювання геометрії великих контейнерів із радіоактивними відходами обов'язково має супроводжуватися їхнім примусовим обертанням на платформі або скануванням за кількома осями.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексне дослідження метрологічних та інструментальних характеристик прецизійного спектрометричного комплексу на базі напівпровідникового HPGe-детектора високої роздільної здатності. Отримані експериментальні результати дозволяють зробити такі висновки:

1. Реалізовано калібрування детектора, яке дозволило побудувати криву ефективності реєстрації детектора в широкому енергетичному діапазоні від 50 до 1500 кеВ. Експериментальні дані демонструють високу ефективність у низькоенергетичній області з її монотонним рівномірним зниженням при підвищенні енергії гамма-квантів, що повністю узгоджується із фундаментальними законами ослаблення випромінювання в речовині.
2. Визначено інструментальну стійкість системи до інтенсивних вхідних потоків іонізуючого випромінювання. Встановлено, що спектрометр зберігає задекларовану точність за мертвого часу до 15–20 %, після чого апаратні ефекти накладання імпульсів призводять до втрат швидкості рахунку в низькоенергетичній області спектра.
3. Виявлено, що вплив кута падіння пучка є критичним для низьких енергій, стає помірним у середньоенергетичному діапазоні та є мінімальним для енергій понад 1 МеВ завдяки високій проникній здатності жорстких гамма-квантів.
4. Розроблені програмні алгоритми обробки даних та отримані експериментальні залежності мають практичне значення для оптимізації неруйнівного гамма-спектрометричного аналізу радіоактивних відходів. Врахування встановлених меж мертвого часу та кутової анізотропії дозволяє знизити інструментальні невизначеності вимірювань, що гарантує надійне й достовірне визначення питомої активності радіоактивних відходів у повній відповідності до вимог національних та міжнародних нормативних стандартів.

5. Матеріали та ключові результати проведених досліджень пройшли успішну наукову апробацію на III Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та фахівців імені В.М. Воеводіна, де було представлено доповідь «Calibration of gamma detectors for effective determination of nuclear-physical characteristics of nuclear waste».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2010. 864 p.
2. Gilmore G. Practical Gamma-Ray Spectrometry. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2008. 398 p.
3. Calibration of HPGe detectors using certified reference materials of natural origin / G. Xhixha, M. Alberi, M. Baldoncini, et al. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2016. Vol. 307. P. 1507–1517.
4. Semiempirical Efficiency Calibration in Semiconductor HPGe Gamma-Ray Spectroscopy / M. Daković, D. Kostić, Z. S. Žunić, et al. Journal of Spectroscopy. 2018. Vol. 2018. P. 5392658.
5. Combes, L., and N. Ruiz. Méthode d'Étalonnage En Rendement Des Chaines de Mesure de Spectrométrie Gamma. CEA – Внутрішній документ, 1 вересня 2016.
6. Re-construction of a HPGe detector precise modeling for efficiency calibration / C. Zhang, P. Liang, L. Wang, et al. Applied Radiation and Isotopes. 2022. Vol. 180. P. 110059.
7. Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB). Recommended Nuclear Decay Data. Nucléide-Lara. 2018. URL: <http://www.lnhb.fr/home/nuclear-data> (дата звернення: 06.05.2026).

ДОДАТОК

Додаток 1

```

import os
import re
import shutil

#Глобальні змінні
SPECTRES_DOSSIER = r"C:\GENIE2K\CAMFILES\Spectres_B17193_temps_mort"
RPT_PATH = r"C:\GENIE2K\REPFILES"
RESULT = r"C:\GENIE2K\REPFILES\Spectres_B17193_temps_mort"
ENERGY_TOLER = 0.5
LIST_ENERGY = [59.54, 661.66, 1332.49]
REGEX_DEAD_TIME = re.compile(r'Dead\sTime\s*:\s*([0-9]+\.[0-9]+)\s*%')
REGEX_ENERGY = re.compile(r'\s*[mM]?[0-9]+\s*[0-9]+-\s*[0-9]+\s*[0-9]+\.[0-9]+\s*([0-9]+\.[0-9]+)\s*[0-9]+\.[0-9]+-\s*([0-9]+\.[0-9]+)\s*[0-9]+\s*([1-9]\.[0-9]+E[+][0-9]+)\s*[0-9]+\.[0-9]+\s*[0-9]+\s*[0-9]+E[+][0-9]+')

def ENERGY_VERIF(energy:float) :
    # Функція перевіряє, чи є розпізнаний пік тим піком, який нас цікавить, на основі його енергії
    for myenergy in LIST_ENERGY :
        if myenergy-ENERGY_TOLER < float(energy) and myenergy+ENERGY_TOLER > float(energy) :
            # Енергія, що міститься в лініях з регулярним виразом, відповідає енергії, що нас цікавить, з точністю до похибки
            return myenergy
    return None

def RPT_CREATE(adress_home, adress_work) :
    # Функція створення файлу RPT на основі спектра
    for root, dirs, files in os.walk(adress_home):
        # Для всіх CNF у папці, що містить спектри
        for file in files:
            full_path = os.path.join(root, file)
            os.system(r'analyze ' + f"{full_path}" + r' /seq="C:\GENIE2K\CTLFILLES\PICSSURFREPRE.ASF" >void')
            shutil.copy(os.path.join(RPT_PATH, file[:-3]+'rpt'), adress_work)

def RPT_READ(path) :
    # Прочитати файл RPT, створений на основі спектра, щоб знайти та витягти дані, які нас цікавлять
    mondt = ''
    LIST_N_COUPS = []
    with open(path, 'r') as f :
        fileop = f.read().splitlines()
        for line in fileop :
            resultsdt = REGEX_DEAD_TIME.match(line)
            resultsen = REGEX_ENERGY.match(line)
            if resultsdt :
                mondt = resultsdt.group(1)
            if resultsen:
                energy_stock = ENERGY_VERIF(resultsen.group(1))
                if energy_stock :
                    LIST_N_COUPS.append(resultsen.group(2))
    return mondt, LIST_N_COUPS

RPT_CREATE(SPECTRES_DOSSIER, RESULT)

```

```

# Збереження значень для створення відповідного рядка у файлі CSV
LIST_DEAD_TIME = []
LIST_COMPTAGE_PICS = []
for root, dirs, files in os.walk(RESULT):
    for filerpt in files:
        if filerpt.endswith('.rpt'):
            secfull_path = os.path.join(root, filerpt)
            mondt, LIST_N_COUPS = RPT_READ(secfull_path)
            LIST_DEAD_TIME.append(mondt)
            LIST_COMPTAGE_PICS.append(LIST_N_COUPS)

FINISH = zip(LIST_DEAD_TIME, LIST_COMPTAGE_PICS)

with open(os.path.join(RESULT, 'Resultat_Temps_Mort.csv'), 'w', encoding='utf-8') as f:
    #Cr  er un fichier type csv
    for line in FINISH:
        # додає до рядків значення, збережені у списках
        dt = line[0]
        list_count = line[1]
        f.write(dt + ',')
        for e in list_count:
            f.write(e+',')
        f.write("\n")

```

Додаток 2

```

import os
import re
import shutil

#Глобальні змінні
SPECTRES_DOSSIER = r"C:\GENIE2K\CAMFILES\B12096_Angles"
RPT_PATH = r"C:\GENIE2K\REPFILES"
RESULT = r"C:\GENIE2K\REPFILES\B12096_Angles"
ENERGY_TOLER = 0.5
LIST_ENERGY = [59.54, 661.66, 1332.49]
REGEX_ANGLE = re.compile(r'Sample\sGeometry\s*:\s([0-9+])\s*')
REGEX_RN = re.compile(r'Sample\sType\s*:\s([A-Z]+-[0-9+])\s*')
REGEX_ENERGY = re.compile(r'\s*[mM]?[0-9]+\s*[0-9]+-\s*[0-9]+\s*[0-9]+\s*[0-9]+\s*([1-9].[0-9]+E+[0-9+])\s*[0-9]+\s*[0-9]+\s*[0-9]+E+[0-9+]\s*')
DICT_AM241 = {}
DICT_CS137 = {}
DICT_CO60 = {}
LIST_ANGLE = ['0', '30', '45', '60', '70', '80', '90', '120', '150', '180']
def ENERGY_VERIF(energy:float) :
    #Функція перевіряє, чи є розпізнаний пік тим піком, який нас цікавить, на
    #основі його енергії
    for myenergy in LIST_ENERGY :
        if myenergy-ENERGY_TOLER < float(energy) and myenergy+ENERGY_TOLER >
float(energy) :
            # Енергія, що міститься в лініях з регулярним виразом, відповідає енергії
            #інтересу з точністю до похибки
            return myenergy
    return None

def RPT_CREATE(adress_home, adress_work) :
    #Функція створює файл RPT із спектру
    for root, dirs, files in os.walk(adress_home):
        #Для всіх CNF в папці де зберігаються спектри
        for file in files:
            full_path = os.path.join(root, file)
            os.system(r'analyze ' + f"{full_path}" + r'
/seq="C:\GENIE2K\CTLFILES\PICSSURFREP.ASF" >void')
            shutil.copy(os.path.join(RPT_PATH, file[:-3]+'rpt'), adress_work)

RPT_CREATE(SPECTRES_DOSSIER, RESULT)
def RPT_READ(path) :
    # Читає файл RPT створений зі спектру для знаходження та збору даних, які
    #нас цікавлять
    LIST_N_COUPS = []
    with open(path, 'r') as f :
        fileop = f.read().splitlines()
        for line in fileop :
            resultsang = REGEX_ANGLE.match(line)
            resultsen = REGEX_ENERGY.match(line)
            if resultsang :
                monang = resultsang.group(1)
            if resultsen:
                energy_stock = ENERGY_VERIF(resultsen.group(1))
                if energy_stock :
                    LIST_N_COUPS.append(resultsen.group(2))
    return monang, LIST_N_COUPS

def GET_RN(path):

```

```

#Читає файл RPT створений зі спектру для знаходження елемента (еквівалентно
RPT_READ)
with open(path, 'r') as f :
    fileop = f.read().splitlines()
    for line in fileop :
        resultrn = REGEX_RN.match(line)
        if resultrn :
            return resultrn.group(1)

for root, dirs, files in os.walk(RESULT):
    #Перевіряє в який словник треба додати отримані значення від функції
    RPT_READ
    for filerpt in files:
        if filerpt.endswith('.rpt'):
            secfull_path = os.path.join(root, filerpt)
            if GET_RN(secfull_path) == r'AM-241' :
                LIST_ENERGY = [59.54]
                monang, LIST_N_COUPS = RPT_READ(secfull_path)
                print(secfull_path)
                print(monang)
                print(LIST_N_COUPS)
                DICT_AM241[monang]=LIST_N_COUPS[0]
            if GET_RN(secfull_path) == r'CS-137' :
                LIST_ENERGY = [661.66]
                monang, LIST_N_COUPS = RPT_READ(secfull_path)
                DICT_CS137[monang]=LIST_N_COUPS[0]
            if GET_RN(secfull_path) == r'CO-60' :
                LIST_ENERGY = [1332.49]
                monang, LIST_N_COUPS = RPT_READ(secfull_path)
                DICT_CO60[monang]=LIST_N_COUPS[0]

#Збереження ліній із значеннями для додання в CSV
LINE_ANGLE = ','
LINE_AM = ''
LINE_CS = ''
LINE_CO = ''
with open(os.path.join(RESULT, 'Resultat_Angles.csv'), 'w', encoding='utf-8')
as f:
    #Створює файл типу CSV
    for angle in LIST_ANGLE:
        #Додає лінії з отриманими значеннями в відповідні лінії
        LINE_AM += DICT_AM241[angle]+','
        LINE_CS += DICT_CS137[angle]+','
        LINE_CO += DICT_CO60[angle]+','
        LINE_ANGLE += angle +','
    f.write(LINE_ANGLE + '\n' + 'AM-241' + ',' + LINE_AM + '\n' + 'CS-
137,'+LINE_CS + '\n' + 'CO-60,'+LINE_CO + '\n') #Додає лінії до CSV

```



```

        os.remove(src_rpt)
    except OSError as e:
        print(f'Помилка: не вдалося виконати видалення файла
{src_rpt}: {e}')
    else:
        print(f"Помилка: Звіт не було сформовано для файлу {file}")

def RPT_READ(path):
    #Зчитування rpt та повернути {енергія, кількість частинок}
    found_peaks = {energy: 0.0 for energy in LIST_ENERGY}
    if not os.path.exists(path):
        return found_peaks

    with open(path, 'r') as f:
        for line in f:
            resultsen = REGEX_ENERGY.match(line)
            if resultsen:
                energy_val = float(resultsen.group(1))
                energy_stock = ENERGY_VERIF(energy_val)
                if energy_stock:
                    found_peaks[energy_stock] = float(resultsen.group(2))
    return found_peaks

def AGGR_DATA(result_dir):
    #Перегрупування всіх файлів rpt, розрахунок середньо-квадратичне
    відхилення, витягування дати вимірювання
    full_data = []
    if not os.path.exists(result_dir):
        return pd.DataFrame()

    files = sorted([f for f in os.listdir(result_dir) if f.endswith('.rpt')])

    for filename in files:
        path = os.path.join(result_dir, filename)
        peaks = RPT_READ(path)
        data_peaks = {en: counts for en, counts in peaks.items() if
isinstance(en, float)}

        # Отримання дати вимірювання з назви файла(YYYY_MM_DD -> DD_MM_YYYY)
        date_match = re.search(r'(\d{4})_(\d{2})_(\d{2})', filename)
        if date_match:
            yyyy, mm, dd = date_match.groups()
            label = f"{dd}_{mm}_{yyyy}"
        else:
            label = filename # Якщо формат дати не співпадає

        data_peaks['date_label'] = label
        full_data.append(data_peaks)

    if not full_data:
        return pd.DataFrame()

    # Перетворює словник на таблицю
    df = pd.DataFrame(full_data).set_index('date_label').fillna(0)
    return df

def REPORT_OUTLINERS(df, k = 3.0, ignore_zeros = True):
    # Видає енергетичні лінії для яких кількість частинок > ср.значення + k *
    середньо-квадратичне відхилення
    if df.empty:

```

```

        return pd.DataFrame()
# Стовбці = енергії
num = df.select_dtypes(include = 'number').copy()
# Якщо 0 - немає пікуб краще забрати значення зі статистики
if ignore_zeros:
    num = num.replace(0, pd.NA)

mu = num.mean(skipna = True)
sd = num.std(skipna = True, ddof = 1)
thr = mu + k * sd
# mask : True для ndc > ср. значення + k * середньо-квадратичне відхилення
mask = num.gt(thr)
# Збирає всі зареєстровані частинки у таблицю
out = (num.where(mask).stack().rename("counts").reset_index().rename(columns
{"level_0" : "date_label", "level_1" : "energy"}))

if out.empty:
    print(f'Pas des valeurs au-dessus de la moyenne + {k}*sigma.')
    return out
# Додати радіонуклід та нижню границю
out["nuclide"] = out["energy"].map(NUC_VOC)
out["mean"] = out["energy"].map(mu)
out["std"] = out["energy"].map(sd)
out["threshold"] = out["energy"].map(thr)
# Додати назву документа
if "source_file" in df.columns:
    meta = df[["source_file"]].reset_index().rename(columns
{"date_label": "date_label"})
    out = out.merge(meta, on = "date_label", how = "left")
# Візуалізувати результат
out = out.sort_values(["energy", "date_label"])

for _, r in out.iterrows():
    file_tag = r["source_file"] if "source_file" in out.columns and
pd.notna(r["source_file"]) else r["date_label"]
    print (f"[{file_tag}] {r['nuclide']} {r['energy']} keV: {r['counts']}
> {r['threshold']}: .3g}")
    return out

def PLOT_RES(df):
    if df.empty:
        print("Données pour l'affichage sont absentes.")
        return

    n_cols = 2
    n_rows = math.ceil(len(LIST_ENERGY) / n_cols)
    fig, axes = plt.subplots(n_rows, n_cols, figsize=(15, n_rows * 4))
    axes = axes.flatten()

    for i, energy in enumerate(LIST_ENERGY):
        ax = axes[i]
        if energy in df.columns:
            data = df[energy]
            nuclide = NUC_VOC[energy]

            mean_val = data.mean()
            std_val = data.std()

            ax.hist(data, bins='auto', color='skyblue', edgecolor='black',
alpha=0.7)

```



```

        ax.axvline(mean_val, color='red', linestyle='dashed', linewidth=2,
label=f'Mean: {mean_val:.2f}')
        ax.axvline(mean_val - std_val, color='orange', linestyle='dotted',
linewidth=1.5, label=f'Std: {std_val:.2f}')
        ax.axvline(mean_val + std_val, color='orange', linestyle='dotted',
linewidth=1.5)

        ax.set_title(f"Distribution: {nuclide} ({energy} keV)")
        ax.set_xlabel("Nombre de coups")
        ax.set_ylabel("Fréquence (Nombre de spectres)")
        ax.legend()
    else:
        ax.set_visible(False)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("Rapport statistique sur toutes les spectres")
stats = df.describe().loc[['mean', 'std']]
print(stats)

if __name__ == "__main__":

    RPT_CREATE(SPECTRES_DOSSIER, RESULT)

    df_results = AGGR_DATA(RESULT)

    outliers = REPORT_OUTLINERS(df_results, k = 2.0, ignore_zeros = True)

    PLOT_RES(df_results)

```