

Розглянуто багатofункціональність типових гамма-спектрометричних комплексів, які повинні вирішувати різноманітні задачі прикладної ядерної гамма-спектрометрії. До таких задач відносять: визначення нуклідного та елементного складу речовини; розробка системи визначення метрологічних коефіцієнтів реєстрації гамма-випромінювання об'ємних зразків; розробка системи стабілізації та пониження фону; розробка системи внутрішнього захисту. Показано, що ці системи виступають у ролі автономних дослідницьких стендів, які зазвичай існують як незалежні підрозділи

Ключові слова: ядерна гамма-спектрометрія, гамма-спектрометричний комплекс, дослідницький стенд, метрологія, стандартизація, порядкові шкали, захист, фон

Рассмотрена многофункциональность типовых гамма-спектрометрических комплексов, которые должны решать различные задачи прикладной ядерной гамма-спектрометрии. К таким задачам относятся: определение нуклидного и элементного состава вещества; разработка системы определения метрологических коэффициентов регистрации гамма-излучения объемных образцов; разработка системы стабилизации и понижения фона; разработка системы внутренней защиты. Показано, что эти системы выступают в качестве автономных исследовательских стендов, которые обычно существуют как независимые подразделения

Ключевые слова: ядерная гамма-спектрометрия, гамма-спектрометрический комплекс, исследовательский стенд, метрология, стандартизация, порядковые шкалы, защита, фон

ДОСЛІДНИЦЬКІ СТЕНДИ НА ОСНОВІ ТИПОВОГО ГАММА-СПЕКТРО- МЕТРИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

О. М. Поп
Інженер*

E-mail: oksana_pop@i.ua

М. В. Стець

Науковий співробітник*

В. Т. Маслюк

Доктор фізико-математичних наук,
завідувач відділу*

*Відділ фотоядерних процесів
Інститут електронної фізики НАН України
вул. Університетська, 21, м. Ужгород,
Україна, 88000

1. Вступ

Предмет дослідження відноситься до ядерної фізики – прикладної ядерної гамма-спектрометрії (ПЯГС) з використанням серійних напівпровідникових детекторів, що входять до типових гамма-спектрометричних комплексів (ГСК). До типових ГСК відносять комплекси, які використовують комерційні серійні, і відповідно, доступні вузли наукового обладнання. Ці комплекси виконують багато задач, в першу чергу – визначення нуклідного та елементного складу, та вмісту речовини. Для вирішення цих задач необхідне відповідне метрологічне забезпечення (стандарти), відповідний захист від фону, тощо.

У багатьох випадках такі типові гамма-спектрометричні комплекси включають, зокрема, пасивні вузли захисту детекторів від зовнішнього гамма-випромінювання, та захисту доквілля детектора, включаючи експериментатора, від випромінювання зразка. Від якості систем захисту залежить рівень фону, та якість кінцевих результатів. Тому ці системи захисту розвиваються і потребують дослідження та вдосконалення. Такі дослідження можна виконувати на дослідницьких стендах – лабораторному обладнанні для проведення

вимірювальних (метрологічних) операцій отримання числових величин, які характеризують досліджувані чинники (фактори), що реалізоване на типових ГСК. Такі ГСК повинні мати метрологію (метрологічне забезпечення); обладнання, та методика вимірювань повинні бути стандартизованими (стандартизація).

Розглянемо типовий гамма-спектрометричний комплекс. Він являє собою систему, котра складається з: детектора Д іонізуючих частинок (в нашому випадку – гамма-квантів. Це, як правило – типовий прилад; у нас: Ge(Li) – детектор ДГДК-100(В); попереднього підсилювача, підсилювача, багатоканального аналізатора імпульсів, тощо; програмного забезпечення; зовнішнього захисту (ЗЗ) – металевої конструкції, призначеної для захисту детектора від зовнішнього по відношенню до ЗЗ випромінювання – пониження фону системи.

Якщо детектори та електроніка являють собою більш – менш стандартні вузли, зовнішній захист являє собою металеву конструкцію, призначену для пониження фону детектора. В деяких випадках захист захищає персонал від випромінювання зразка. Конструкція захисту залежить від багатьох факторів і тому може бути суттєво індивідуальною. Такими

факторами є: задачі, для яких використовується ГСК; місце розташування ГСК (детекторного приміщення); місце розташування наукового приміщення (лабораторії) – географічні координати; інше.

Гамма-спектрометричний комплекс ІЕФ НАНУ використовує напівпровідниковий Ge(Li) – детектор ДГДК 100В, розміщений в пасивному, багатопаровому (Pb+Cd+Fe+Cu+Al) 4π – зовнішньому захисті.

Зараз ГСК відповідає, в основному, вимогам сучасної ПЯГС опромінених зразків (наведена активність) та природної активності зразків масою 100–1000 г, з межею таких вимірів на рівні питомих активностей >10 Бк/кг, та похибкою >10 %. Значення питомих активностей на рівні 10 Бк/кг відповідають інтенсивностям I на рівні $n - 10^{-3}$ імп/с. Цей рівень – це рівень інтенсивностей гамма-фону. Вкажемо, що мова йде про спектрометрію природної гамма-активності, спектр якої визначається, в основному, одним і тим же сплеском гамма-активних нуклідів – членів рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Тому спектр фону \approx спектр зразка.

Межа можливостей, не в останню чергу, визначається рентабельною тривалістю вимірів: $\leq 4-8$ годин/зразок. Можна вважати, що ця межа є межею «непокращуваності» – якщо не змінити умови роботи гамма-спектрометричного комплексу, тоді весь час будемо знаходитись біля неї. Тому покращення параметрів ГСК завжди є актуальною проблемою.

2. Літературний огляд та постановка проблеми

Одним із шляхів вирішення вказаної нижче колізії (див. п. 3) є (що підтверджує розгляд у літературних джерелах [1, 2]) використання системного підходу, зокрема, погляд на дослідницькі лабораторії як складні системи, які повинні бути функціонально повними, щоб забезпечити своє існування та розвиток.

Завважимо також, що загалом зазначена проблематика, та відповідно дослідження, виходить за межі власне предметної області ПЯГС, наближаючись до проблематики мультиагентних систем в теорії штучного інтелекту [3]. Мультиагентні системи можна розглядати як математично-комп'ютерну модель реальних фізично існуючих багатофункціональних систем [4].

Більш конкретні питання покращення параметрів методик ПЯГС розглядаються в [5, 6] (методи визначення нуклідного та елементного складу речовини; в [7–9] (розробка системи визначення метрологічних коефіцієнтів реєстрації гамма-випромінювання об'ємних зразків); в [10–12] (розробка системи стабілізації та пониження фону; розробка системи внутрішнього захисту).

Проблема покращення гамма-спектрометричних методик, що включає покращення як пристроїв, так і їх процедур, є постійно актуальною. Стандартним сучасним шляхом покращення методик є заміна обладнання на більш сучасне; використання найбільш сучасних методів та методик. Цей напрямок «еволюції» наукових досліджень робить науково-дослідні лабораторії, які не в змозі здійснити такі зміни, маргінальними – не дивлячись на попередні здобутки, лабораторії не витримують конкуренції.

Збільшення та ускладнення аналітичних проблем обумовлене різними чинниками, не в останню чергу

зростаючим техногенним трансфером речовини. Величезні кількості різноманітних матеріалів транспортується на величезні відстані. Разом з цими матеріалами неминуче відбувається трансфер природної та техногенної радіоактивності, інших токсичних хімічних елементів, та їх сполук. Тому на фоні постійного погіршення стану довкілля, збільшення та ускладнення аналітичних проблем, виведення діючих лабораторій на узбіжжя магістральних сучасних досліджень є недоцільним.

3. Мета та задачі досліджень

Методи та методики ПЯГС створювались на протязі тривалого часу. Деякі з них опубліковані. Однак порівняльний розгляд різних методик, що реалізуються на одному і тому ж гамма-спектрометричному комплексі, не був здійснений. Тому задачею дослідження є проведення порівняльного розгляду методик, як дослідницьких стендів, кожен з яких має свою конкретну автономну функцію. Багатофункціональність гамма-спектрометричного комплексу, яка встановлюється, дозволяє реалізувати частково, а потім і повністю, функціональну повноту діючого гамма-спектрометричного комплексу.

4. Дослідницькі стенди з використанням гамма-спектрометричних комплексів

Розглянемо деякі функції, які здійснюються з використанням гамма-спектрометричного комплексу в якості дослідницьких стендів. Нагадаємо, що дослідницькі стенди призначені, в основному, для дослідження та отримання експериментальним шляхом серії однотипних даних, зокрема функціональних залежностей. У нашому випадку – таких задач декілька. Це, зокрема:

- визначення нуклідного та елементного складу речовини;
- розробка системи визначення метрологічних коефіцієнтів реєстрації гамма-випромінювання об'ємних зразків;
- розробка системи стабілізації та пониження фону;
- розробка системи внутрішнього захисту.

Виразом для розрахунків питомої активності A_p гамма-активних нуклідів у зразку є [9]:

$$A_p = I / (n \cdot k \cdot T_{CJ}), \quad (1)$$

$I = \Delta S / T_{CJ}$ – інтенсивність лінії гамма-активного нукліда; n – квантовий вихід лінії гамма-активного нукліда; k – маса зразка; ΔS – площа лінії гамма-активного нукліда в апаратурному гамма-спектрі зразка; T_{CJ} – «живий» час вимірів; T_B – метрологічний коефіцієнт реєстрації – коефіцієнт, що ставить у відповідність величині I величину A_p .

Видно, що у вказаних виразах, які є основними виразами ядерної гамма-спектрометрії, основні фізичні величини (які виступають як змінні) пов'язані між собою, і характеризують зразок, процедуру вимірів, та, певним чином, середовище, де ці виміри відбуваються.

Тобто описують ГСК як систему. Це означає, що зафіксувавши одну групу змінних, можна дослідити, та визначити інші змінні. Суттєвої та постійної потреби у зовнішніх системах (підрозділах) немає. Такі системи, які здатні виконувати багато функцій, тобто є багатофункціональними, прийнято називати функціонально повними.

Практично це означає, що можна на одному ГСК реалізувати різні дослідницькі стенди. Огляд таких стендів розглянуто нижче.

4.1. Дослідницький стенд для визначення елементного та нуклідного складу об'ємних зразків

Методи активаційного аналізу та ядерна гамма-спектрометрія дозволяють визначити вміст хімічних елементів (ХЕ), або гамма-активних нуклідів (ГАН). Під вмістами розуміють масу k , концентрацію c , питому активність A_n , і т. д.

Метрологія. Робочим виразом для розрахунків питомої активності A_n гамма-активного нукліду в зразку є вираз (1).

Стандартизація. Для вирішення багатьох методичних проблем: виділяється (і фіксується – закріплюється як позиція) фіксоване місце для вимірювання зразків (на рис. 2 – позиція 8); досліджувані зразки відповідно стандартизують – по розмірам, формі, масі, агрегатному стану, і т. п. Видно, що змінною величиною є чинник – маса k зразка. Зміна маси означає зміну розмірів зразка. Отже, змінюючи зразок, змінюється вміст хімічних елементів чи гамма-активних нуклідів. Всі інші вузли, як чинники – незмінні. Таким чином, ГСК використовується як дослідницький стенд для визначення елементного та нуклідного складу зразків. Для визначення вмістів необхідно отримати метрологічні коефіцієнти реєстрації TB .

4.2. Дослідницький стенд для визначення метрологічних коефіцієнтів реєстрації

Визначення метрологічних коефіцієнтів реєстрації TB можна здійснити на ГСК, використовуючи його в якості стенда для їх отримання.

Відомо, що:

$$T = \epsilon \cdot \frac{\Omega}{4\pi} - \text{світосила гамма-спектрометра,}$$

где $\epsilon = \epsilon(E_g)$ – абсолютна фотоефективність реєстрації гамма-кванта з енергією E_g

Фотоефективність $\epsilon = \epsilon(E_g)$ є “власною” характеристикою будь-якого детектора випромінювання. Визначення цієї залежності в необхідному для аналізу діапазоні енергій – складна експериментальна задача.

Відносний тілесний кут $\Omega/4\pi$ характеризує геометричні розміри як зразка (котрий може бути як точковим, так і будь-якої форми), так і геометричні розміри чутливої зони детектора, а також взаємне положення (наприклад, відстань) зразка і детектора. Розрахунок $\Omega/4\pi$ – громіздка в математичному плані робота, навіть для зразків з наявністю декількох осей симетрії. Окрім цього, в кожному випадку цей математичний розрахунок потребує експериментального підтвердження, тому є громіздкою процедурою і в експериментальному плані.

B – коефіцієнт, що враховує втрати гамма-квантів при проходженні їх через речовину зразка, корпус та інші конструкційні деталі детектора, тощо. Коефіцієнт B , крім залежності від вказаних вище факторів, залежить також від маси та хімічного складу зразка, його однорідності, густини, матеріалу упаковки зразка, тощо. Тому B фактично можна розглядати як добуток декількох різних за природою коефіцієнтів: $B = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \dots$. Точний розрахунок коефіцієнтів B для кожного конкретного зразка практично неможливий.

Тому, в багатьох практичних випадках, значення T , ϵ , $\Omega/4\pi$, B , визначаються експериментально. Оскільки як T , так і B , залежать фактично від одних і тих же чинників, є резон розглядати їх як один коефіцієнт

$$TB = T \cdot B = \epsilon \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \dots, \quad (2)$$

і визначити його одночасно, в одному експериментальному дослідженні.

Коефіцієнт TB виконує, як видно, метрологічні функції – він переводить експериментальну величину ΔS у розмірну кількісну величину A_n . Тому є сенс називати його метрологічним коефіцієнтом реєстрації. Необхідність метрологічного забезпечення прикладної ядерної гамма-спектрометрії об'ємних зразків розглянута в [9, 12, 13].

4.3. Експериментальне визначення метрологічних коефіцієнтів реєстрації

У вираз (1) входять експериментальні величини I/pk . Таким чином, отримано множину дискретних двовірних експериментальних залежностей коефіцієнтів $TB = f(E_g)$, $k = \text{const}$, для кожного значення маси k зразка. Кожна з цих дискретних залежностей може бути апроксимована певною функцією, і, таким чином, здійснено перехід до неперервних двовірних залежностей.

Отримані двовірні залежності коефіцієнтів достатні для вирішення широкого кола гамма-спектрометричних задач, зокрема екологічних.

4.4. Поверхні метрологічних коефіцієнтів реєстрації

Маючи дискретну множину експериментальних значень метрологічних коефіцієнтів TB , які служать в якості реперних, можна отримати більш складну, але зручнішу для практичних задач ПЯГС конструкцію – тримірну неперервну залежність $TB = f(E_g, k)$. Її можна представити аналітично (у вигляді емпіричної неперервної залежності), таблично (у вигляді дискретних значень TB для фіксованих значень пар E_g і k), та графічно, у вигляді поверхні TB .

На рис. 1 у якості приклада приведені залежності $TB = f(E_g, k)$. Для їх визначення було використано зразкове джерело ОІСН-171 для мас k , г: 100; 150; 250; 300; 441; 500; 550; 600; 650; 750; 800 та вимірювальний циліндричний посуд діаметром 100 мм. Гамма-спектрометрія виконана на спектрометричному комплексі, до якого входить Ge (Li) – детектор ДГДК – 100В. Тривалість одного виміру 30 хв.

Поверхні TB , приклад яких ілюструється на рис. 1, представлені у вигляді електронних таблиць, де є можливість отримання більш точних значень метрологічного коефіцієнта реєстрації.

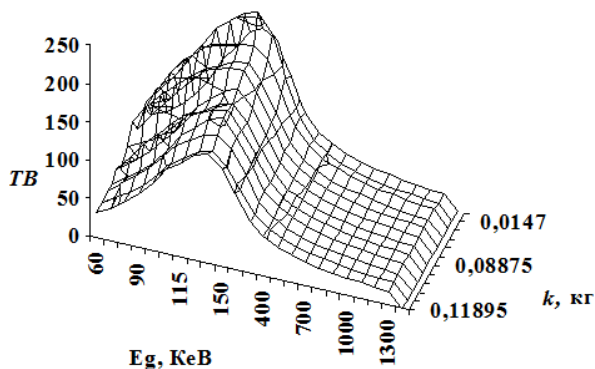


Рис. 1. Залежність метрологічного коефіцієнта реєстрації TB від енергії E_g , гамма-квантів нукліда та маси k зразка

4. 5. Дослідницький стенд для розробки системи стабілізації та пониження фону типового гамма-спектрометричного комплексу, і оцінки ефективності її розробки

На основі аналізу основних факторів, що впливають на роботу ГСК (див. вище), була розроблена система стабілізації та пониження фону (ССПФ) типового ГСК [13], яка складається зокрема із підсистем (вузлів): фіксованого об'єму та складу повітря ФОСП, та ФОСП-К; шлюзів; температурних градієнтів; теплоізоляції; верхнього зовнішнього та внутрішнього захисту (ВЗ).

Геометрії. Реалізація необхідних технічних рішень йшла поступово. Ці кроки (поступове підключення одного чи декількох елементів нових підсистем у ССПФ) умовно назвали геометріями. Наступна геометрія, як правило, включала попередню. Загалом було досліджено 21 геометрію, у деяких із яких були використані різні конструкції внутрішнього захисту. Зовнішній вигляд ССПФ приведено на рис. 2.

Вибір геометрій здійснювався з використанням впорядкованого масиву значень коефіцієнтів ефективності захисту KEZ (про величини KEZ – див. далі) Ефективність розробки ССПФ ілюструє рис. 3.

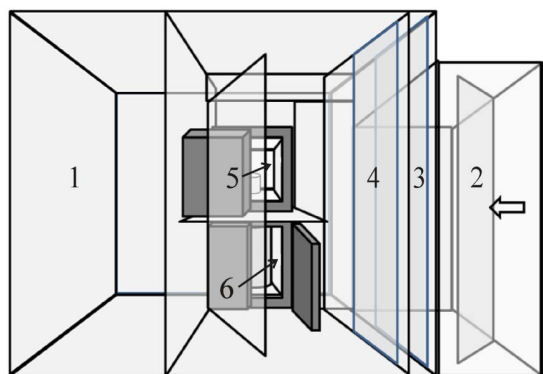


Рис. 2. Зовнішній вигляд системи стабілізації та пониження фону ССПФ: 1 – елемент підсистеми фіксованого об'єму та складу повітря ФОСП; 2-4 – шлюзи; 5 – зовнішній верхній захист; 6 – зовнішній нижній захист

Вкажемо, що при розробці системи стабілізації та пониження фону ССПФ важливу роль грали:

- фактори вартості;
- оперативності її виготовлення і розгортання;
- очистки, та реновації.

4. 6. Визначення коефіцієнтів ефективності захисту

В процесі розробки ССПФ була отримана та використана шкала порядків. У цій шкалі можна безпосередньо порівнювати дані різних геометрій Γ_x між собою, визначивши для цієї мети відносні величини – коефіцієнти ефективності захисту (KEZ):

$$KEZ = \frac{I(\Gamma_{баз})}{I(\Gamma_x)}, \tag{3}$$

де $\Gamma_{баз}$ – вибрана базова геометрія (геометрія порівняння). Тому $I(\Gamma_{баз})$ – одиниця вимірювання, що задає власне шкалу порядків. На рис. 3 наведені значення KEZ (лінія 1461 KeV ^{40}K), для різних геометрій Γ_x (Γ_3 – геометрія, де відсутній зовнішній захист, і вибрана як $\Gamma_{3баз}$). Видно, що впорядкована множина значень KEZ є експоненціальною залежністю (див. формулу на рис. 3; це є закономірним для ослаблення гамма-випромінювання), і яка на рис. 3 позначена суцільною лінією. R^2 – коефіцієнти детермінації [12]. Такі залежності отримані і для інших ліній гамма-активних нуклідів.

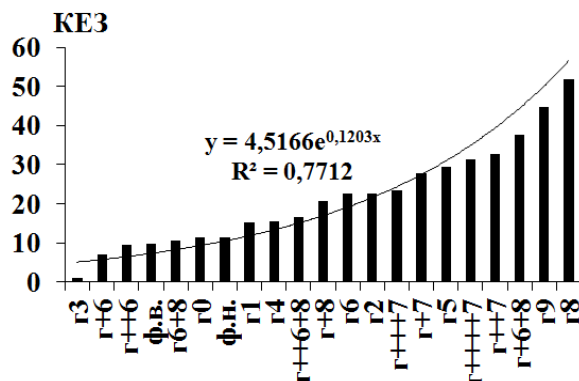


Рис. 3. Експериментальна залежність значень коефіцієнтів ефективності захисту KEZ для різних геометрій (нуклід ^{40}K ; $E_g=1461$ KeV)

Визначаючи KEZ , таким чином, ГСК здійснює метрологічні функції. Тут він діє як дослідницький стенд для оцінки ефективності розробки ССПФ – супроводу цієї розробки – на основі порівняльного аналізу впорядкованих у шкалі порядків метрологічних коефіцієнтів ефективності захисту KEZ .

4. 7. Дослідницький стенд для дослідження ефективності внутрішнього захисту типових гамма-спектрометричних комплексів

Розглянемо детальніше конструкцію вузла верхнього (зовнішнього та внутрішнього) захисту. На рис. 4 [13] приведено схему (в перерізі) вузла верхнього зовнішнього захисту. У ньому розташовані елементи фіксованого об'єму та складу повітря ФОСП-К (поз. 6), теплоізоляційна (поз. 10), та пілозахисна (поз. 11) ширми; розташовані двері верхнього захисту (поз. 12), що складаються з шарів, аналогічних вказаним вище. В робочому просторі цього, верхнього зовнішньо-

го захисту, розміщений об'єкт нашої уваги – вузол внутрішнього захисту (ВЗ) (поз. 7), що знаходиться безпосередньо біля верхньої частини вакуумованого та охолоджуваного скрапленим азотом криостата (поз. 9), в якому знаходиться кристал детектора.

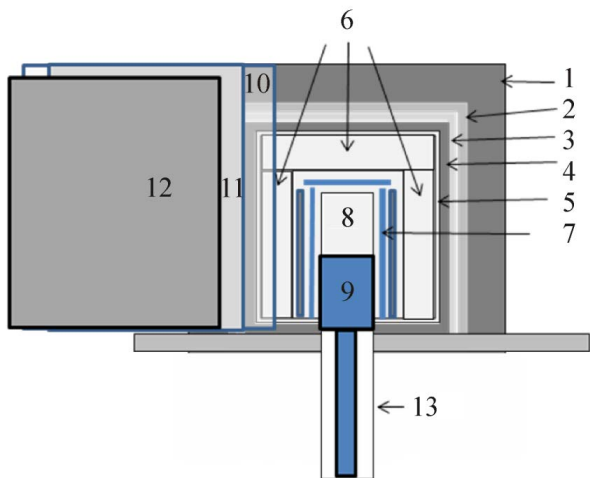


Рис. 4. Вузол верхнього захисту ССПФ.

1–5 – зовнішній верхній захист; 6 – підсистема фіксованого об'єму та складу повітря ФОСП-К; 7 – елемент внутрішнього захисту; 8 – позиція зразка; 9 – криостат детектора; 10 – теплоізоляційна ширма; 11 – пилозахисна ширма; 12 – двері зовнішнього верхнього захисту; 13 – холодопровід детектора

Аналіз отриманих значень КЕЗ, показав, що використання внутрішнього захисту у вузлі верхнього захисту збільшує значення КЕЗ (рис. 3). На рис. 5 наведені залежності:

$$KEZ = \frac{I(\Gamma_{++66аз})}{I(\Gamma_x)}, \tag{4}$$

де $\Gamma_{++66аз}$ – геометрія, у якій відсутній вузол ВЗ, але є інші вузли верхнього захисту. Видно, що коли можливості інших вузлів, зокрема верхнього зовнішнього захисту, вичерпані (геометрія Γ_3 виключена з порівняння), внутрішній захист «працює» – покращує КЕЗ.

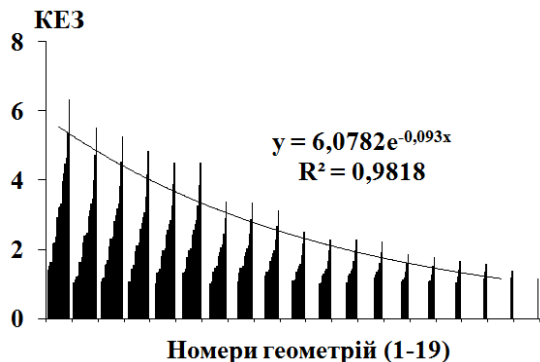


Рис. 5. Експериментальна залежність значень коефіцієнтів ефективності захисту КЕЗ для різних геометрій внутрішнього захисту

Прикладна ядерна гамма-спектрометрія різних, в тому числі і об'ємних зразків, потребує відповідно «власної», індивідуальної конструкції внутрішнього захисту.

Раніше нами КЕЗ використовувались, як зручний спосіб оцінки правильності напрямку розробки ССПФ ГСК (в бік покращення (збільшення значень КЕЗ), як єдиної системи. Зараз увага зосереджується тільки на одному вузлі – вузлі внутрішнього захисту ВЗ, який займає певну фіксовану позицію у загальній конструкції вузла верхнього захисту ГСК. Таким чином, мають місце основні ознаки дослідницького стенда:

- стандартизації – заповнюючи цю позицію (поз. 7 на рис. 3) вузлом внутрішнього захисту певної конструкції, замінюючи його на вузли інших конструкцій ВЗ, і не змінюючи інші вузли (підсистеми) ГСК у загальній конструкції захисту ГСК, зосереджуємось на виявленні впливу тільки одного чинника – внутрішнього захисту;
- метрології – у результаті вимірювань різних конструкцій внутрішнього захисту, можна отримати залежності: $I=f$ (конструкція ВЗ); $KEZ=f$ (конструкція ВЗ).

5. Висновки

Узагальнимо дані в порівняльній табл. 1 – використання гамма-спектрометричного комплексу в якості дослідницьких стендів.

Таблиця 1

Використання гамма-спектрометричного комплексу в якості дослідницьких стендів

Функція ГСК	Змінні чинники	Постійні чинники	Метрологічне забезпечення	Література
Визначення вмістів	досліджувані зразки	вузли ГСК	ТВ	[9]
Залежності ТВ	розміри зразків	вузли ГСК	стандартні зразки	[9]
Розробка ССПФ	підсистеми ССПФ	нема	шкала КЕЗ	[12]
Залежності КЕЗ	підсистеми ССПФ	нема	шкала порядків	[12]
Вибір ВЗ	конструкції ВЗ	інші вузли ГСК	шкала КЕЗ	[13]

Розглянуто розроблені дослідницькі стенди, які діють, і знаходяться в експлуатації.

Розглядаються п'ять дослідницьких стендів (перший стовпчик табл. 1, де вказані основні функції стендів). Це підтверджує багатофункціональність діючого типового гамма-спектрометричного комплексу.

Багатофункціональність у значній мірі забезпечує його функціональну повноту: реалізовані в дослідницьких стендах функції гамма-спектрометричного комплексу забезпечують в основному його існування та розвиток.

Тема дослідження функціональної повноти таких складних систем, як гамма-спектрометричний комп-

лекс, не вважається вичерпаною. Ґрунтовний розгляд всіх функцій гамма-спектрометричного комплексу – це окрема тема.

Значення багатофункціональних можливостей гамма-спектрометричного комплексу зростає з часом,

коли припиняють свою діяльність попередні державні підрозділи метрології та стандартизації, котрі забезпечували необхідним весь процес вимірів, та коли суттєво зростає роль економічних чинників у наукових дослідженнях.

Література

1. Садовский, В. Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития [Текст] / В. Н. Садовский. – М.: Наука, 1980. – 275 с.
2. Титов, В. В. Закон функциональной полноты «Системно-морфологический подход в технике, науке, социальной сфере» [Текст] / В. В. Титов, 2003. – 79 с.
3. Люгер, Джордж Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем [Текст] / Джордж Ф. Люгер; 4-е издание. – М.: Наука, 2003. – 864 с.
4. Стець, М. В. Емпіричний вибір моделей прикладної ядерної гамма-спектрометрії [Текст] / М. В. Стець // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія хімія. – 2007. – Вип. 18. – С. 116–125.
5. Köhler, M. A new low-level γ -ray spectrometry system for environmental radioactivity at the underground laboratory Felsenkeller [Text] / M. Köhler, D. Degering, M. Laubenstein, P. Quirin, M.-O. Lampert, M. Hult, D. Arnold, S. Neumaier, J.-L. Reyss // Applied Radiation and Isotopes. – 2009. – № 67. – P. 736–740.
6. Hurtado, S. Optimized background reduction in low-level gamma-ray spectrometry at a surface laboratory [Text] / S. Hurtado, M. García-Leon, R. García-Tenorio // Applied Radiation and Isotopes. – 2006. – № 64. – P. 1006–1012.
7. Jodłowski, P. Correction factors to account for minor sample height variations in gamma-ray spectrometry [Text] / P. Jodłowski // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2007. – № 580. – P. 238–241.
8. Helmer, R. G. Modern tools for precise γ -ray spectrometry with Ge detectors [Text] / R. G. Helmer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2003. – № 505. – P. 297–305.
9. Поп, О. М. Експериментальне визначення метрологічних коефіцієнтів ядерної гамма-спектрометрії об'ємних зразків [Текст] / О. М. Поп, М. В. Стець // Науковий Вісник Ужгородського університету. Сер. Фізика. – 2010. – Вип. 28. – С. 93–98.
10. Vidmar, T. Close-geometry efficiency calibration in gamma-ray spectrometry using radionuclides with a two-step cascade decay [Text] / T. Vidmar, M. Korun, A. Likar // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2003. – № 508. – P. 404–413.
11. Molnár, G. L. Wide energy range efficiency calibration method for Ge detectors [Text] / G. L. Molnár, Zs. Révay, T. Belgya // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2002. – № 489. – P. 140–159.
12. Юркуц, Ю. Ю. Система стабілізації та пониження фону в гамма-спектрометричному комплексі [Текст] / Ю. Ю. Юркуц, О. М. Поп, М. В. Стець, В. Т. Маслюк // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2011. – Вип. 30. – С. 188–196.
13. Патент на корисну модель №79328. Дослідницький стенд для визначення метрологічних коефіцієнтів ефективності внутрішнього захисту типових гамма-спектрометричних комплексів [Текст] / Стець М. В., Поп О. М. – Від 25.04.2013 р. – Бюл. №8.