

[0000-0001-6368-7362] **Р. В. Берестов**, аспірант,

e-mail: ruslan.v.berestov@lpnu.ua

ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТАМЕТРОЛОГІЯ»

вул. Січневого прориву, 84, м. Біла Церква, 09113, Україна

[0000-0003-2666-2187] **Н. Є. Гоц**, д-р техн. наук, професор,

професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій

e-mail: nataliia.y.hots@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОНУКЛІДІВ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ДЖЕРЕЛ α -, β -, γ -ВИПРОМІНЕННЯ

В статті розглянуто методи вимірювання активності джерел іонізуючого випромінювання. Розглянуто нормативні документи, які нормують безпеку використання джерел іонізуючого випромінювання. На основі аналізу літератури сформовано класифікацію методів вимірювання активності радіонуклідів залежно від фізичного принципу реєстрації випромінювання. Зазначено вимоги до методів, які можуть бути застосовані для вимірювання активності джерел іонізуючого випромінювання під час їх калібрування, а саме: висока точність, а отже, непевність результатів вимірювання не перевищує 10 %, та простота їх технічної реалізації. Проведено аналіз літературних джерел щодо різних методів. Докладно розглянуто сцинтиляційний та іонізаційний методи і засоби їх реалізації. Визначено переваги сцинтиляційного та іонізаційного методів для практичного використання для калібрування джерел іонізуючого випромінювання і спектрометрів α -, β -, γ -випромінювання. Результати вимірювання активності радіонуклідів сцинтиляційним методом гамма-спектрометром СЕГ-05 та результати вимірювання активності радіонуклідів іонізаційним методом гамма-спектрометром ORTEC GEM-130 зображено на графіках. Отримані результати вимірювань, проведених цими методами, свідчать про те, що сцинтиляційний та іонізаційний методи вимірювання активності радіонуклідів найкраще підходять для застосування при калібруванні джерел іонізуючого випромінювання, оскільки непевність результатів вимірювання, проведених цими методами, не перевищує 7,5 % та є одного рівня.

Ключові слова: сцинтиляційний метод, напівпровідниковий метод, спектрометр, детектор, іонізуюче випромінювання.

Вступ. У міру розширення використання іонізуючого випромінювання (ІВ) в промисловості, медицині та науці збільшується і потенціальний ризик небезпеки для здоров'я людини, якщо джерело ІВ використовується або функціонує неналежним чином та ІВ потрапляє до організму людини.

Внутрішній вплив ІВ на людину відбувається за рахунок того, що радіонукліди вдихаються, поглинаються чи іншим чином потрапляють у кровообіг. Класифікацію впливу ІВ на людину, запропоновану Всесвітньою організацією охорони здоров'я, подано в таблиці 1 [1].

Внутрішній вплив іонізуючого випромінювання на людину завершується, лише коли радіонуклід виводиться із організму самостійно чи в результаті лікування.

Зовнішній вплив ІВ на людину відбувається внаслідок зовнішнього опромінювання з джерела ІВ та припиняється в тому випадку, коли людина виходить за межі поля випромінювання цього джерела.

Безпека використання джерел ІВ нормується такими документами [2, 3, 4]:

- Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97);
- Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005);
- Державні санітарні правила і норми «Гігієнічні вимоги до влаштування та експлуатації рентгенівських кабінетів і проведення рентгенологічних процедур» (ДСанПіН 6.6.3-150-2007).

У зв'язку з широким використанням джерел іонізуючого випромінювання в медицині та промисловості та для створення безпечних умов практичної діяльності з джерелами іонізуючого випромінювання необхідно проводити їх калібрування, а саме перевірку їх метрологічних характеристик, зокрема активності радіонуклідів. Під час калібрування проводиться вимірювання активності джерела ІВ, що може бути реалізовано за допомогою різних методів вимірювання ІВ.

В промисловості для калібрування джерел ІВ використовуються засоби вимірювальної техніки – еталонні міри ІВ. Джерела ІВ характеризуються фізичною величиною – активністю радіонукліда відповідно α -, β -, γ -випромінювання. Активність джерела ІВ – це відношення кількості спонтанних ядерних переходів з визначеного ядерно-енергетичного стану радіонукліда dN , що відбуваються у відповідній його кількості за інтервал часу dt :

$$A = \frac{dN}{dt}. \quad (1)$$

В процесі калібрування еталонні джерела ІВ можуть застосовуватися у двох формах: як еталонні міри та як міри-компаратори.

Метою статті є формування класифікації та дослідження методів вимірювання активності радіонуклідів α -, β -, γ -випромінювання, які можуть бути застосовані в процесі калібрування джерел ІВ.

Задачі дослідження. Провести аналіз наявних методів вимірювання активності радіонуклідів. Визначити методи вимірювання активності, які мають точність вимірювання не більше 10 % та які можна було б застосувати для методу подовження терміну експлуатації джерел на основі результатів їх калібрування.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо методи вимірювання активності ІВ залежно від фізичного принципу реєстрації випромінювання. Загальну класифікацію методів вимірювання активності іонізуючого випромінювання подано в таблиці 2 [5, 6, 11]. Деякі з цих методів переважно використовуються в наукових дослідженнях, інші – в прикладній спектрометрії. Разом з тим деякі методи практично перестали використовуватися, напри-

клад метод фільтрів іонізуючого випромінювання. У той же час кристало-дифракційний метод і метод магнітного аналізу не набули значного поширення через технічні труднощі в їх реалізації. Кристало-дифракційний метод і метод магнітного аналізу належать до абсолютних, оскільки для визначення енергії використовуються незалежні способи вимірювань. Зазначені методи трудомісткі і зазвичай не дають змоги вимірювати спектр випромінювання в усьому енергетичному діапазоні одночасно.

Метод обмеженого тілесного кута застосовується в основному при вимірюванні α -випромінювання та низькоенергетичного фотонного випромінювання (від 1 до 80 кеВ). Водночас використовуються пропорційні лічильники, сцинтилятори із ZnS, тонкі кристали із CsI, а також напівпровідникові детектори. Мінімальна похибка вимірів активності оцінюється в 0,1 % для α -випромінювання та 1 % для фотонного випромінювання. Менш перспективним цей метод є для вимірювання активності за випромінюванням, оскільки наявність великої кількості поправочних коефіцієнтів збільшує похибку методу до 5–10 %.

Метод 4π -рахунку призначений для вимірювання активності α - та β -випромінюючих нуклідів. Він реалізується за допомогою лічильників Гейгера-Мюллера, пропорційних 4π -лічильників, монокристалічних сцинтиляційних детекторів, а також детекторів на основі рідких сцинтиляторів. Похибка визначення питомої активності α - та β -випромінювачів під час використання пропорційних лічильників оцінюється в 0,3–0,5 %, а за допомогою рідких сцинтиляторів – 0,2–0,3 % (для випромінювачів з максимальною енергією понад 150 кеВ) і 0,05–0,1 % (для випромінювачів). Для низькоенергетичних випромінювачів похибка вимірювання активності становить 1–3 %.

Метод внутрішнього наповнення, або метод внутрішнього газового рахунку, застосовується для зміни активності нуклідів з малою енергією часток (^1H , ^{14}C , ^{28}S та ін.). Використовуються пропорційні лічильники, в яких передбачені заходи щодо виключення кінцевого ефекту. Похибка вимірювання активності низькоенергетичних β -випромінювачів становить приблизно 1 %.

Таблиця 1 – Класифікація впливу ІВ на людину

Вплив ІВ	Джерела надходження ІВ
Запланований вплив ІВ, зумовлений навмисним використанням та роботою з джерелами випромінювання з конкретною метою	<ul style="list-style-type: none"> • медичні прилади для діагностування та лікування; • технічні об'єкти в промисловості; • наукові дослідження
Вплив наявних природних та промислових джерел ІВ, коли дія випромінювання вже існує і необхідно лише вжити відповідних заходів щодо контролю	<ul style="list-style-type: none"> • радон у житлових будинках; • робочі місця; • навколишнє середовище; • природні джерела
Вплив ІВ в надзвичайних ситуаціях, зумовлених непередбаченими подіями, які передбачають оперативні заходи	<ul style="list-style-type: none"> • техногенні катастрофи; • ядерні конфлікти; • зловмисні та терористичні дії

Таблиця 2 – Методи вимірювання активності радіонуклідів

Назва методу	Фізичний принцип
1. Метод абсолютного рахунку іонізуючих частинок	Метод вимірювання активності радіонуклідів, що базується на вимірюванні за допомогою відповідного детектора кількості іонізуючих частинок, що випускаються радіонуклідним джерелом всередині тілесного кута за певний інтервал часу
2. Метод 4π (2π)-рахунку	Метод абсолютного рахунку іонізуючих частинок, що здійснюється за допомогою 4π (2π)-детектора
3. Метод обмеженого тілесного кута	Метод абсолютного рахунку іонізуючих частинок, що здійснюється за допомогою лічильника, який реєструє іонізуючі частинки всередині тілесного кута, обмеженого діафрагмою
4. Метод внутрішнього наповнення	Метод абсолютного рахунку заряджених частинок, що здійснюється за допомогою введення радіоактивного зразка в рідкій або газовій фазі в детектор внутрішнього наповнення
5. Метод внутрішнього газового наповнення	Метод внутрішнього наповнення, що здійснюється за допомогою введення газового радіоактивного зразка в газовий іонізаційний детектор внутрішнього наповнення
6. Метод внутрішнього рідинного наповнення	Метод внутрішнього наповнення, що здійснюється за допомогою введення рідкого радіоактивного зразка в рідинний сцинтиляційний детектор
7. Метод трьох наповнень	Метод абсолютного рахунку фотонів характеристичного випромінювання електрозахватних радіонуклідів, що здійснюється за допомогою газорозрядного 4π -лічильника, наповнюється послідовно газом-наповнювачем і тим же газом з додаванням двох різних кількостей важкого інертного газу
8. Електростатичний метод вимірювання активності радіонуклідів	Метод абсолютного рахунку заряджених частинок, що здійснюється шляхом вимірювання електричного заряду, що виникає в радіонуклідному джерелі випромінювання в результаті вильоту з нього заряджених частинок, що випускаються при ядерному перетворенні радіонукліда
9. Метод збігів заряджених частинок і фотонів	Метод збігів, що здійснюються за допомогою роздільної реєстрації заряджених частинок і фотонів, що випускаються радіонуклідним джерелом випромінювання, в поєднанні з рахунком тимчасових збігів між ними
10. Метод збігів фотонів	Метод збігів, що здійснюється за допомогою роздільної реєстрації двома або більше детекторами різних фотонів, випускаються радіонуклідним джерелом випромінювання, в поєднанні з рахунком тимчасових збігів між ними
11. Індикаторно-екстраполяційний метод	Метод вимірювання активності бета-випромінюючих радіонуклідів, що базується на додаванні до радіонукліда відомої кількості бета-гамма-випромінюючого радіонукліда-індикатора і на зміні методом $4\pi\beta\gamma$ -збігів сумарної активності обох радіонуклідів з екстраполяцією результатів до 100 % -ї ефективності реєстрації бета-частинок 4π -лічильником

Метод збігів використовується для вимірювання активності нуклідів, розпад яких супроводжується випромінюванням одного або декількох фотонів γ - або рентгенівського випромінювання. При вимірюванні активності цим методом реєструються збіги між α -частинками та фотонами ($\alpha\gamma$ -збіги), між двома γ -квантами ($\gamma\gamma$ -збіги), між β -частинками і фотонами ($\beta\gamma$ -збіги) і т. д. Цей метод реалізується за допомогою установок збігів, що мають два вимірювальні канали, у кожному з яких використовується детектор з максимальною чутливістю до одного виду випромінювання. Вимірювальні канали працюють як у самостійному режимі, так і у режимі збігів.

Електростатичний метод базується на вимірюванні електричного заряду, накопиченого на ізольованому джерелі за рахунок винесення з нього заряду протилежного знака α - або β -частинками. Знаючи заряд, накопичений джерелом за певний час, і тип розпаду, можна визначити активність нукліду у джерелі. Оскільки цей метод не має жодних переваг перед іншими методами вимірювань і, крім того, є низка складнощів у його реалізації, він не отримав широкого застосування.

Аналіз методів абсолютних вимірювань активності нуклідів показує, що жоден із них не є універсальним. Кожний метод має свої переваги та недоліки.

Абсолютні методи вимірювань використовуються лише в наукових дослідженнях та в метрологічній практиці. В останньому випадку абсолютні методи реалізуються в еталонних установках. У всіх інших випадках використовують методи відносних вимірювань. Ці методи значно простіші в практичній реалізації, методика вимірювання в них не вимагає аналізу та оцінювання джерел похибки в тому обсязі, як це потрібно для абсолютних методів. Засоби вимірювань, що реалізують такі методи, відрізняють простота роботи з ними та порівняно невисока вартість.

Усі методи абсолютних вимірювань активності радіонуклідів можна зробити відносними, якщо градування приладів та установок здійснювати за допомогою зразків з відомим вмістом радіонукліду [8].

Основними вимогами до методів, які можуть бути застосовані для вимірювання активності джерел ІВ під час їх калібрування, є такі:

- висока точність, а отже, непевність результатів вимірювання не перевищує 10 %;
- простота їх технічної реалізації.

Подібними характеристиками наділені сцинтиляційний та іонізаційний методи.

На відміну від описаних вище методів, деякі з яких є занадто громіздкими для практичної реалізації, інші на цей час є застарілими, сцинтиляційний та іонізаційний методи постійно розвиваються та вдосконалюються. Як приклад можна навести антикомptonівську гамма-спектрометричну систему для проб навколишнього середовища [7].

Сцинтиляційний метод [6, 9, 10] базується на аналізованні сцинтиляції. Вони виникають у деяких речовинах при взаємодії цих речовин з іонізуючим випроміненням. Дотепер отримано багато речовин зі сцинтилюючими властивостями (рисунок 1). Їх розділяють: за хімічним станом – на органічні та неорганічні, за фізичним станом – на рідкі, газоподібні та тверді.



Рисунок 1 – Приклади сцинтиляторів

Основною властивістю сцинтиляторів є невеликий час висвічування. Загальний час спалаху в неорганічних сцинтиляторах становить приблизно 10^{-7} с. Ще менший час для органічних сцинтиляторів – 10^{-7} - 10^{-9} с. Друга особливість – пропорційність між інтенсивністю спалаху та енергією, що втрачена іонізуючою часткою чи квантом у сцинтиляторі. Також важливо те, що можливо виготовити сцинтилятори великих розмірів і заданої форми. Це дає змогу створювати сцинтиляційні детектори широкого призначення. В α -спектрометрії використання сцинтиляторів обмежено монокристалами CsI (Tl) (рисунок 2). Зазвичай застосовують тонкі монокристали для зменшення фону від β - і γ -випромінювань.

Дуже обмежені можливості в β -спектрометрії сцинтиляторів через сильне відбиття від поверхні сцинтиляторів електронів. Це характерно для неорганічних кристалів. Тому перевагу віддають органічним кристалам антрацена і стільбена. Деколи використовують рідкі сцинтилятори, зокрема для вимірювання спектра низькоенергетичних β -випромінювачів (^3H , ^{14}C , ^{35}S).



Рисунок 2 – Альфа спектрометр СЕА

Найбільш успішним виявилось використання сцинтиляторів у спектрометрії γ -випромінювання (рисунок 3). Найчастіше використовують кристал $\text{NaI}(\text{Tl})$. З інших неорганічних сцинтиляторів використовують $\text{CsI}(\text{Tl})$, найчастіше в спектрометрії рентгеновського та низькоенергетичного γ -випромінювання.



Рисунок 3 – Сцинтиляційний гамма-бета-спектрометр MKS-AT1315

Рідкі сцинтилятори використовують при вимірюванні спектрів γ -випромінювання високих енергій, тому що на їх основі можна створити детектори великих розмірів. Сцинтиляційні спектрометри можуть вимірювати енергію, відносну інтенсивність і зовнішнє

випромінювання. Їм потрібно попереднє градування, оскільки вони є приладами для відносних вимірювань.

Іонізаційний метод [11, 12, 13, 14, 15] побудований на вимірюванні іонізаційного ефекту. Він виникає в чутливому об'ємі детектора при взаємодії з ним іонізуючого випромінювання. Використовують в основному три види іонізаційних детекторів: напівпровідниковий детектор, імпульсна іонізаційна камера з сіткою та пропорційний лічильник. Чутливий об'єм іонізаційної камери та пропорційного лічильника заповнюється робочим газом, який складається з інертного газу з додаванням багатоатомного газу – метану. У напівпровідниковому детекторі створюється чутлива область, в якій немає вільних носіїв заряду. Потрапляючи в цю область, заряджена частинка викликає іонізацію. Відповідно у валентній зоні з'являються дірки, а в зоні провідності – електрони. Під дією напруги, що прикладена до нанесеної на поверхню чутливої зони електродів, виникає рух дірок та електронів, що приводить до виникнення імпульсу струму. Прикладання напруги до напівпровідникового кристалу в кількості декількох кВ забезпечує збір усіх зарядів, утворених частинкою в обсязі детектора.

Кремнієві детектори і детектори з надчистого германію (HPGe) використовують для реєстрації заряджених частинок. Чутлива область кремнієвих детекторів товщиною до 5 мм відповідає пробігу протонів з енергією ~ 30 MeV та α -частинок з енергією ~ 120 MeV; для германію товщиною 5 мм – пробігу протонів і α -частинок з енергіями ~ 40 MeV і ~ 160 MeV відповідно. Германієві детектори можуть бути виготовлені з більш товстою чутливою областю.

Всім іонізаційним детекторам необхідно, щоб пробіг заряджених частинок повністю укладався в чутливій області. Тільки тоді існує прямий зв'язок між амплітудою вихідного сигналу і енергією частинки [16].

Це не поширюється на γ -детектори, оскільки взаємодія γ -випромінювання з речовиною чутливого об'єму цих детекторів здійснюється за допомогою ефекту утворення пар, фотоефекту та комптонівського ефекту.

Спектрометри з іонізаційними детекторами використовуються в α -, β - і γ -спектрометрії. Для вимірювання енергетичного розподілення α -випромінювання вико-

ристовують спектрометри з іонізаційними камерами.

Спектрометр з пропорційним лічильником застосовується як у β -спектрометрії, так і в спектрометрії рентгенівського та низькоенергетичного γ -випромінювання. Поверхнево-бар'єрні кремнієві детектори використовуються в основному в спектрометрії α -випромінювання.

Спектрометри з кремнієвими дифузійно-дрейфовими детекторами вимірюють β -спектри, а також спектри рентгенівського і низькоенергетичного γ -випромінювання. Германієві детектори дали змогу створити γ -спектрометри, що мають високі технічні параметри.

Найбільш широке практичне застосування з-поміж розглянутих спектрометрів отримали спектрометри зі сцинтиляційними і напівпровідниковими детекторами. Спектрометрія з напівпровідниковими детекторами має деякі переваги порівняно з іншими, а саме: невисокий рівень енергії, яка витрачається на створення пари електрон-дірка в кремнії та германії, – близько 3 eV; високі коефіцієнти поглинання (на декілька порядків вищі, ніж у газах; проте менші, ніж у сцинтиляторах NaI(Tl), CsI(Tl)), що дає можливість повністю поглинути енергію іонізуючої частинки в досить тонкому шарі; досить висока рухливість носіїв заряду, що дає змогу уникнути труднощів з реєстрацією частинок, які проникають на різні глибини в чутливу зону детектора; за розділенням напівпровідникові спектрометри кращі за сцинтиляційні спектрометри, це дає можливість одержати весь спектр одночасно і забезпечує вищу швидкість набору статистики та, відповідно, оперативність у роботі [17] (рисунк 4).

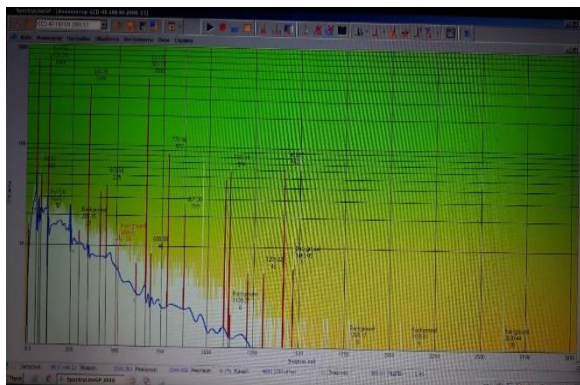


Рисунок 4 – Спектри напівпровідникового спектрометра

Результати досліджень. На рисунку 5 прямою лінією зображено еталонне значення радіонукліда, кривою – результати вимірювання активності радіонуклідів сцинтиляційним методом. Непевність результатів вимірювання становить 7,06 %, що є задовільним для цього методу. На рисунку 6 прямою лінією зображено еталонне значення радіонукліду, кривою – результати вимірювання активності радіонуклідів іонізаційним методом. Непевність результатів вимірювання становить 7,02 %, що також задовольняє вимогам точності.

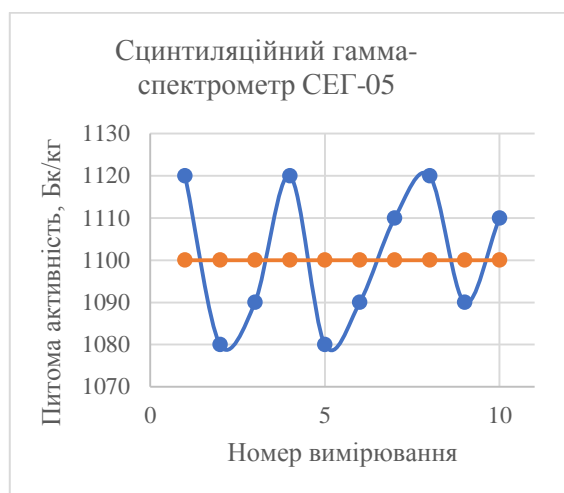


Рисунок 5 – Результати вимірювання активності радіонуклідів сцинтиляційним методом гамма-спектрометром СЕГ-05

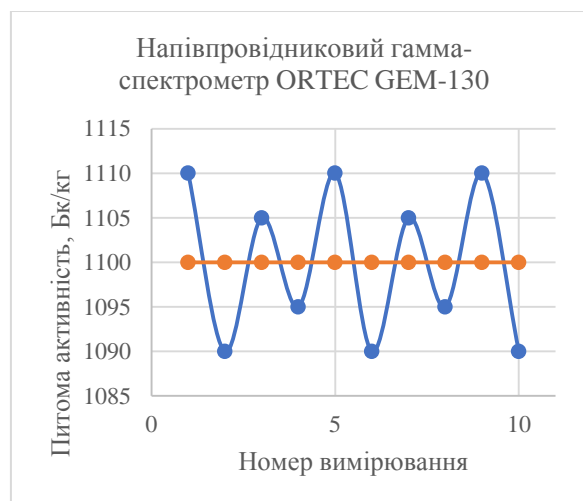


Рисунок 6 – Результати вимірювання активності радіонуклідів іонізаційним методом гамма-спектрометром ORTEC GEM-130

Обговорення результатів. В лабораторії було проведено калібрування об'ємного джерела іонізуючого випромінювання з радіонуклідом ^{137}Cs .

Непевність результатів вимірювання сцинтиляційним методом отримана в лабораторії за нормальних умов вимірювань (температура = 19 °С, вологість = 59 %, тиск = 99,4 кПа). Було проведено по 10 вимірювань для забезпечення коефіцієнта охопту 2. Отримано такі результати: невизначеність результатів вимірювань типу А – 0,48 %, невизначеність по типу В – 3,5 %, стандартна невизначеність – 3,53 %. Розширена невизначеність становила 7,06 %.

Непевність результатів вимірювання іонізаційним методом отримана в лабораторії за нормальних умов вимірювань (температура = 20 °С, вологість = 61 %, тиск = 99,8 кПа). Було проведено по 10 вимірювань для забезпечення коефіцієнта охопту 2. Отримано такі результати: невизначеність результатів вимірювань типу А – 0,25 %, невизначеність по типу В – 3,5 %, стандартна невизначеність – 3,51 %. Розширена невизначеність становила 7,02 %.

Отримані результати свідчать про те, що сцинтиляційний та іонізаційний методи вимірювання активності радіонуклідів найкраще підходять для застосування при калібруванні джерел іонізуючого випромінювання, оскільки непевність результатів вимірювань, проведених цими методами, є одного рівня та не перевищує 7,5 %, що відповідає заданим значенням [18, 19].

Висновок. Для напівпровідникового методу характерна висока розподільна здатність, а саме здатність приладу розділити дві близько розміщені на енергетичній шкалі групи моноенергетичного випромінювання одного роду. Фізичний зміст цього параметра – мінімальна різниця в енергіях ΔE двох моноенергетичних груп частинок або фотонів, які розрізняються по спектру, що дає можливість точніше визначати активність різних видів радіонуклідів у пробі. Це є перевагою цього методу при практичному застосуванні. Для сцинтиляційного методу характерна висока ефективність ресстрації, а саме відношення кількості частинок енергії, що зареєстровані в піці повного поглинання в одиницю часу, до зовнішнього випромінювання джерела, встановленого на заданій і фіксованій відстані від

детектора. Цей метод дає можливість точнішого визначення характеристики моноенергетичного піку окремого радіонукліду в пробі.

На основі дослідження визначено, що сцинтиляційний та іонізаційний методи вимірювання активності радіонуклідів мають точність, не більшу 10 %, що вказує на можливість їх застосування для методу подовження терміну експлуатації джерел на основі результатів їх калібрування.

Список використаних джерел

- [1] "Ионизирующее излучение, последствия для здоровья и защитные меры" [Электронный ресурс.] Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/factsheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>.
- [2] "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>.
- [3] "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України" [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text>.
- [4] "Державні санітарні правила і норми "Гігієнічні вимоги до влаштування та експлуатації рентгенівських кабінетів і проведення рентгенологічних процедур". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1256-07#Text>.
- [5] ISO 12749-1: 2020 Ядерна енергія – Словник. Частина 1: Загальна термінологія.
- [6] Ю. И. Брегадзе, Э. К. Степанов, и В. П. Ярына, *Прикладная метрология ионизирующих излучений*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1990.
- [7] А. Висмес, Р. Гурриаран, та Х. Кагнат, "Антикомптонівська гамма-спектрометрія для проб навколишнього середовища". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/pdf/2009/05/radiopro44113.pdf>.
- [8] ISO 19581: 2017 Вимірювання радіоактивності – Гамма-випромінюючі радіонукліди – Метод швидкого скринінгу з використанням сцинтиляційного детектора гамма-спектрометрії.

- [9] В. А. Грабовський, *Прикладна спектроскопія йонізуючих випромінювань*. Львів, Україна: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2008.
- [10] А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, и Е. С. Матусевич, *Основы экспериментальных методов ядерной физики*. Москва, Россия: Атомиздат, 1970.
- [11] М. Ф. Юдин и др., *Измерение активности радионуклидов: справ. пособие*. Санкт-Петербург, Россия, 1997.
- [12] Н. Д. Бекетов, Е. И. Денисов, и В. Д. Пузако, *Элементы радиометрии и спектрометрии ионизирующих излучений*. Екатеринбург, Россия: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.
- [13] С. Левчук, "Довідник по основних методах визначення активності радіонуклідів". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://uiar.org.ua/Dovidnyk.pdf>.
- [14] В. И. Бойко, и М. Е. Силаева, "Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GERINII/posob/Tab3/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%B8%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%8F%D0%B4%D0%B5.pdf>.
- [15] ДСТУ ISO 10703-2001 Захист від радіації. Визначення об'ємної активності радіонуклідів методом гамма-спектрометрії з високою розподільною здатністю (ISO 10703:1997, IDT). Вид. офіц. Київ, 2003.
- [16] BS EN ISO 18589-1:2021 Вимірювання радіоактивності в навколишньому середовищі. Грунт. Загальні вказівки та визначення.
- [17] П. Йодловски, та С. Ю. Калита, "Лабораторія гамма-спектрометрії для високоточних вимірювань концентрацій радіонуклідів у пробах доквілля". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ7-0014-0024>.
- [18] ДСТУ ISO 7503-1-2001 Захист від радіації. Оцінювання забрудненості поверхні. Частина 1. Бета-випромінювачі (максимальна енергія бета-випромінювання понад 0,15 МеВ) та альфа-випромінювачі (ISO 7503-1:1988, IDT). Вид. офіц. Київ, 2003.
- [19] ДСТУ ISO 2919:2006 Захист від радіації. Джерела радіоактивні закриті. Загальні технічні вимоги та класифікація (ISO 2919:1999, IDT). Вид. офіц. Київ, 2012.

References

- [1] "Ionizing radiation, health effects and protective measures". [Online]. Available: <https://www.who.int/ru/news-room/factsheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures> [in Russian].
- [2] "Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97)". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> [in Ukrainian].
- [3] "Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text> [in Ukrainian].
- [4] "State sanitary rules and regulations" Hygienic requirements for the arrangement and operation of X-ray rooms and X-ray procedures". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1256-07#Text> [in Ukrainian].
- [5] ISO 12749-1: 2020 Nuclear energy – Vocabulary. Part 1: General terminology [in Ukrainian].
- [6] Yu. I. Bregadze, E. K. Stepanov, and V. P. Yaryna, *Applied Metrology of Ionizing Radiation*. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1990 [in Russian].
- [7] A. de Vismes, R. Gurriaran, and H. Kagnat, "Anticompton gamma spectrometry for environmental samples". [Online]. Available: <https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/pdf/2009/05/radiopro44113.pdf> [in Ukrainian].
- [8] ISO 19581: 2017 Measurement of radioactivity - Gamma emitting radionuclides - Rapid screening method using a gamma spectrometry scintillation detector [in Ukrainian].
- [9] V. A. Hrabovskyi, *Applied Spectrometry of Ionizing Radiation*. Lviv, Ukraine: Vyd. tsentr LNU im. Ivana Franka, 2008 [in Ukrainian].
- [10] A. I. Abramov, Yu. A. Kazanskiy, and Ye. S. Matusevich, *Fundamentals of Exper-*

- imental Methods of Nuclear Physics*. Moscow, Russia: Atomyzdat, 1970 [in Russian].
- [11] M. F. Iudin et al., *Measurement of Activity of Radionuclides*: ref. manual. St. Petersburg, Russia, 1997 [in Russian].
- [12] N. D. Beketov, Ye. I. Denisov, and V. D. Puzako, *Elements of Radiometry and Spectrometry of Ionizing Radiation*. Yekaterinburg, Russia: GOU VPO UGTU-UPI, 2004 [in Russian].
- [13] S. Levchuk, "Handbook of basic methods for determining the activity of radionuclides". [Online]. Available: <http://uiar.org.ua/Dovidnyk.pdf> [in Ukrainian].
- [14] V. I. Boiko, and M. Ye. Silayeva, "Methods and instruments for measuring nuclear and other radioactive materials". [Online]. Available: <https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GERINII/posob/Tab3/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%B8%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%8F%D0%B4%D0%B5.pdf> [in Russian].
- [15] DSTU ISO 10703-2001 Radiation protection. Determination of the volumetric activity of radionuclides by high-resolution gamma spectrometry (ISO 10703: 1997, IDT). Official publication. Kyiv, 2003 [in Ukrainian].
- [16] BS EN ISO 18589-1:2021 Measurement of radioactivity in the environment. Soil. General guidelines and definitions [in Ukrainian].
- [17] P. Jodłowski, and S. Yu. Kalita, "Laboratory of gamma spectrometry for high-precision measurements of radionuclide concentrations in environmental samples". [Online]. Available: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ7-0014-0024> [in Ukrainian].
- [18] DSTU ISO 7503-1-2001 Radiation protection. Assessment of surface contamination. Part 1. Beta emitters (maximum beta energy exceeding 0.15 MeV) and alpha emitters (ISO 7503-1: 1988, IDT). Official publication. Kyiv, 2003 [in Ukrainian].
- [19] DSTU ISO 2919:2006 Radiation protection. Closed radioactive sources. General technical requirements and classification (ISO 2919:1999, IDT). Official publication. Kyiv, 2012 [in Ukrainian].

R. V. Berestov¹, *postgraduate*,

e-mail: ruslan.v.berestov@lpnu.ua

¹SE "KYIVOBLSSTANDARTMETROLOGY",

January Breakthrough st., 84, Bila Tserkva, 09113, Ukraine

N. E. Hots², *Dr. Tech. Sc., Professor*,

Professor of the Department of Measuring Information Technologies,

e-mail: nataliia.y.hots@lpnu.ua

²National University "Lviv Polytechnic", S. Bandery st., 12, Lviv, 79013, Ukraine

RESEARCH OF METHODS OF MEASUREMENT OF RADIONUCLIDE ACTIVITY FOR CALIBRATION OF α -, β -, γ -RADIATION SOURCES

The article considers methods for measuring the activity of ionizing radiation sources. The normative documents that regulate the safety of the use of ionizing radiation sources are considered. Based on the analysis of the literature, a classification of methods for measuring the activity of radionuclides depending on the physical principle of radiation registration is formed. Methods for measuring the activity of radionuclides are considered. Analysis of methods for absolute measurements of nuclide activity shows that none of them is universal. Absolute measurement methods are used only in scientific research and in metrological practice. In all other cases, relative measurement methods are used. It is indicated that it is better to use relative methods to measure the activity of radionuclides. Measuring instruments that implement relative methods of measuring activity are easy to operate and have a low cost. Requirements for methods that can be used to measure the activity of ionizing radiation sources during their calibration are specified, namely the uncertainty of the measurement results does not exceed 10 % and the simplicity of their technical implementation. The analysis of literature sources on different methods is carried out. Scintillation and ionization methods and means of their implementation are considered in detail. The advantages of scintillation and ionization methods for

practical use for calibration of ionizing radiation sources and α -, β -, γ -radiation spectrometers are determined. The results of measuring the activity of radionuclides by scintillation method with gamma spectrometer SEG-05 and the results of measuring the activity of radionuclides by ionization method with gamma spectrometer ORTEC GEM-130 are shown in the graphs. The obtained results of measurements performed by these methods indicate that scintillation and ionization methods of measuring the activity of radionuclides are best suited for calibration of ionizing radiation sources, as the uncertainty of measurement results performed by these methods does not exceed 7.5 % and is the same level.

Keywords: *scintillation method, semiconductor method, spectrometer, detector, ionizing radiation.*

Стаття надійшла 10.09.2021

Прийнято 01.10.2021