

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

БЕРЕСТОВ РУСЛАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 539.1.03

**МЕТОД ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ
ЗАКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ**

152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

15 «Автоматизація та приладобудування»

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Руслан Берестов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –

Доктор технічних наук, професор

Наталія ГОЦ

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар разової спеціалізованої

вченої ради

Оксана ГОНСЬОР

Львів – 2024

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В промисловості, медичній практиці та наукових дослідженнях використовуються різні види закритих джерел іонізуючого α - , β - та γ - випромінення (надалі – ДІВ). Їх строк служби - це термін, який встановлюється виробником та визначає час можливого використання відповідного джерела з моменту його виготовлення зі збереженням його метрологічних характеристик.

У разі закінчення строку служби використання закритого ДІВ повинно бути зупинене, оскільки воно може становити небезпеку здоров'ю працівників, які виконують роботи пов'язані з експлуатацією таких джерел, населенню, навколишньому природному середовищу, а також може призвести до виникнення радіаційної аварії. Крім того, відпрацьовані джерела можуть використовуватися у злочинних цілях [1].

За вимогами законодавства та нормативно-правових актів України, відпрацьовані джерела іонізуючого випромінення, у яких закінчився строк служби, підлягають передачі до спеціалізованих підприємств з поводження з радіоактивними відходами для подальшої їх утилізації.

Але, необхідно зазначити, що у разі підтвердження факту збереження метрологічних характеристик, герметичності та відсутності дефектів та їх ознак на закритому ДІВ, його строк служби може бути продовжений в установленому законодавством порядку, що визначено в нормативно-правовому документі України «Технічний регламент закритих джерел іонізуючого випромінювання» [2].

Проте законодавство України не регламентує методику, за якою строк служби закритого джерела іонізуючого випромінення може бути продовжений.

Тому розроблення засад для продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення на основі контролю збереження їх метрологічних характеристик та герметичності є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконувалась робота згідно з планами наукової діяльності кафедри «Інформаційно вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» - теоретичні та прикладні основи метрології та вимірювань в інформаційних технологіях; та Державного підприємства «Київський обласний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації» в рамках науково-дослідної роботи: Розробка методики калібрування «Засоби вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності, поверхневої густини потоку» (державний реєстраційний номер 0222U005309).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення засад продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінювання на основі їх метрологічної керованості.

Для виконання наміченої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз метрологічного забезпечення закритих джерел α -, β -, γ -випромінювання;
- дослідити можливість використання результатів калібрування закритих джерел іонізуючого випромінювання для прийняття рішення щодо продовження строку їх служби;
- вдосконалити процедури калібрування закритих джерел іонізуючого випромінювання з метою застосування її для продовження строку служби ДІВ;
- розробити метод продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінювання на основі контролю статистичної керованості зміни метрологічних характеристик закритих ДІВ.

Об'єкт дослідження – підходи до експлуатації закритих джерел іонізуючого випромінювання.

Предмет дослідження – комплексний аналіз метрологічних та технічних характеристик закритих джерел іонізуючого випромінювання з метою продовження строку їх служби.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети були використані такі методи дослідження: метод звіряння для проведення калібрування джерел

іонізуючого випромінення, статистичні методи для визначення статистичної керованості процесу, метод найменших квадратів для прогнозування терміну експлуатації закритих ДІВ, математичні розрахунки та статистична обробка інформації проводилась за допомогою програмного продукту MS Excel.

Наукова новизна полягає в теоретичному обґрунтуванні та розробці комплексного методу продовження строку експлуатації закритих джерел іонізуючого випромінення на основі опрацювання результатів їх калібрувань та перевірки на герметичність із застосуванням контрольних карт кумулятивних сум:

- проведений аналіз метрологічного забезпечення ДІВ, що дало змогу сформулювати вимоги до методу продовження їх строку на основі контролю та аналізу метрологічних характеристик;

- вперше розроблено засади та математичну модель комплексного методу продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення на основі контролю їх метрологічних характеристик та контролю герметичності та аналізування інформації із застосуванням контрольних карт, що дає можливість прийняти рішення про продовження строку служби закритих ДІВ;

- вдосконалено рівняння сумарної невизначеності результатів калібрування та перевірки на герметичність закритих ДІВ, що дало можливість підвищити точність оцінки невизначеності;

- вперше запропоновано використати дослідження статистичної керованості процесу змін метрологічних характеристик закритих ДІВ протягом строку служби з метою прийняття рішення про його продовження.

Практичне застосування отриманих результатів.

- сформовано вимоги до комплексного методу продовження строку служби джерел іонізуючого випромінення на основі вдосконаленої методики калібрування, перевірки на герметичність та використанні контрольних карт кумулятивних сум;

- вдосконалено методику калібрування закритих джерел іонізуючого випромінення шляхом застосування процедур перевірки на герметичність та

визначення активності та непевності закритого джерела іонізуючого випромінювання;

- розроблений алгоритм застосування контрольних карт кумулятивних сум для дослідження процесу змін метрологічних характеристик закритих ДІВ протягом строку служби з метою прийняття рішення про його продовження;
- Розроблено метод визначення терміну, на який можна продовжити строк експлуатації закритих ДІВ;
- розроблений метод продовження строку служби закритих ДІВ дозволяє продовжити безпечно їх використання в промисловості та принесе значний економічний ефект внаслідок продовження зменшення витрат, пов'язаних з зберіганням та/або захороненням на спеціалізованому підприємстві з поводження з радіоактивними відходами; пов'язаних із закупівлею нових закритих ДІВ за кордоном та постановкою їх на облік.

ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ” використовує результати дисертації при проведенні калібрування, а також продовження строку служби закритих ДІВ для територіальних органів Державної служби України з питань безпеки харчових продуктів та захисту споживачів, відокремлених підрозділів ДП НАЕК “Енергоатом”, державних метрологічних центрів та інших організацій. Було розроблено методика калібрування МК-IR-01-2020 “Засоби вимірювання активності, питомої (об’ємної) активності, поверхневої густини потоку частинок”[3].

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, висновки і дослідження, що представлено до захисту, отримано автором самостійно. Здобувачем особисто сформовано постановку задачі.

Апробація результатів. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на національних і міжнародних наукових конференціях: 11-й міжнародній науково-технічній конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” 9, 10 та 11 жовтня 2018 року, Національний науковий центр “Інститут метрології”, м. Харків[4]; 4-й

міжнародній науково-практичній конференції “Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи” 16-17 травня 2019 року, Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів[5]; Міжнародній конференції метрологів МЦМ’2019 10-12 вересня 2019 року, Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів[6]; 6-й Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології “Technical using of measurement-2020” 4-7 лютого 2020 року, м. Славське[7]; 18-й міжнародному науково-технічному семінарі “Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні, прикладні та методичні аспекти” 13-14 грудня 2021 року, Національний науковий центр “Інститут метрології”, м. Харків[8]; міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022” 9-10 листопада 2022 року, Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів[9]; 6-й міжнародній науково-практичній конференції “Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи ” 16-17 листопада 2023 року, Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів[10].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень та скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 147 сторінок, з яких 92 сторінок основного тексту, що містять 40 формулу, 14 рисунків та 16 таблиць. Список використаних джерел налічує 101 найменувань.

Публікації: За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 6 наукових праць, з них 5 статті у фахових виданнях України, 1 стаття – у науковому періодичному виданні, що включене до міжнародної наукометричної бази даних, 7 тез доповідей.

АНОТАЦІЯ

Берестов Р.В., Метод продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти та науки України, Львів, 2024.

Дисертація присвячена дослідженню та вирішенню проблеми продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення (ДІВ), які використовуються в промисловості України.

У першому розділі проведений аналіз метрологічного забезпечення закритих джерел іонізуючого α -, β -, γ – випромінення. Розглянута природа іонізуючого випромінення, а також його застосування в промисловості та вплив на організм людини і оточуюче середовище. Проведений аналіз джерел іонізуючого випромінення різних видів та їх технічних характеристик. Розглянуто еталонну базу джерел іонізуючого випромінення та методи вимірювання активності нуклідів. Розглянуто законодавче та нормативне забезпечення закритих ДІВ. Згідно нормативно-правового документу України «Технічного регламенту закритих джерел іонізуючого випромінювання» за умови збереження радіаційних характеристик, герметичності та відсутності дефектів закритих джерел іонізуючого α - , β - та γ - випромінення (ДІВ), їх строк служби може бути продовжений в установленому законодавством порядку. Але проведений аналіз нормативних та методичних документів дозволив виявити проблему відсутності методу продовження строку служби закритих ДІВ. Визначено, що рішення про продовження строку служби має базуватися на фактах, які підтверджені перевітками (калібруванням) метрологічних характеристик закритого ДІВ протягом строку його служби, а також передбачати визначення та встановлення додаткового часового інтервалу, протягом якого це джерело може експлуатуватися. В розділі сформована мета та задачі дослідження.

У другому розділі було сформовано вимоги до методу продовження строку служби закритих ДІВ на основі результатів калібрування. Розроблено математичну модель у вигляді системи нерівностей для методу продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення на основі аналізу змін їх метрологічних характеристик протягом строку служби. Проведений аналіз існуючої методики калібрування закритих ДІВ та визначено необхідність її вдосконалення шляхом доєднання процесу перевірки ДІВ на герметичність. В розділі розроблено методику перевірки закритого ДІВ на герметичність та проведений аналіз складових його невизначеності

Обґрунтовано необхідність проведення перевірки на герметичність ДІВ перед проведенням їх калібрування. Розроблено методику перевірки на герметичність закритих ДІВ. Для реалізації цієї мети в розділі вирішені такі завдання: аналізування методу вимірювання активності радіонуклідів та калібрування джерел, аналізування складових невизначеності вимірювання активності радіонуклідів при калібрування ДІВ, розроблення засад методики перевірки герметичності джерел іонізуючого випромінення, аналізування складових непевності перевірки герметичності джерел, формування загального бюджету невизначеності ДІВ, оцінювання невизначеності результатів калібрування джерел іонізуючого випромінення. Сформовано рівняння розширеної невизначеності результатів калібрування закритих ДІВ з врахуванням перевірки на герметичність, що дало можливість підвищити точність оцінки невизначеності.

У третьому розділі розроблена методика застосування контрольних карт для контролю статистичної керованості процесу змін метрологічних характеристик закритого ДІВ. Для цього був проведено аналіз видів контрольних карт, визначено доцільність застосування для закритих ДІВ контрольних карт кумулятивних сум. Вони дозволяють врахувати результати попередніх калібрувань ДІВ та контролювати статистичну керованість змін їх метрологічних характеристик. Розглянуті принципи побудови контрольних карт кумулятивних сум та обтягої V-маски. З метою прогнозування процесу змін метрологічних

характеристик закритого ДІВ проведений порівняльний аналіз застосування методів екстраполяції та запропоноване використання регресійного аналізу та метод найменших квадратів. Результати калібрування за життєвий цикл закритого ДІВ було описано різними регресійними функціями. Обґрунтовано вибір функції для проведення прогнозування, яка найбільш точно описала отримані результати. Враховуючи всі отримані результати було розроблено метод подовження терміну експлуатації закритих джерел іонізуючого випромінювання. Обґрунтований вибір терміну, на який продовжується строк експлуатації закритого ДІВ.

В четвертому розділі проведені експериментальні дослідження та математичне моделювання методу подовження строку служби закритих ДІВ. Проведене оцінювання невизначеності результатів калібрування на прикладі закритого джерела β -випромінювання ІСО-21. Досліджена рівномірність зовнішнього випромінювання закритих джерел α -випромінювання. Проведене моделювання вибору функції для опису змін активності закритого ДІВ за результатами калібрування, для прогнозування строку служби ДІВ.

Ключові слова: джерела іонізуючого випромінювання, іонізуюче випромінювання, метрологічні характеристики, калібрування, еталон, контрольна карта, метод найменших квадратів, метрологічне забезпечення, строк служби, термін експлуатації, невизначеність, вимірювання, регресія, калібрувальна лабораторія.

ABSTRACT

Berestov R.V., The method of extending the service life of closed sources of ionizing radiation - Qualification scientific work on the rights of the manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 "Metrology and information-measuring technology" - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

The dissertation is devoted to the study and solution of the problem of extending the service life of closed sources of ionizing radiation (SIR) used in the industry of Ukraine.

In the first section, an analysis of the metrological support of closed sources of ionizing α -, β -, γ - radiation is carried out. The nature of ionizing radiation, as well as its use in industry and its impact on the human body and the environment, are considered. The analysis of sources of ionizing radiation of various types and their technical characteristics was carried out. The reference base of sources of ionizing radiation and methods of measuring the activity of nuclides are considered. The legislative and regulatory support of closed SIRs was considered. According to the regulatory and legal document of Ukraine "Technical Regulations of Closed Sources of Ionizing Radiation", under the condition of preservation of radiation characteristics, tightness and absence of defects of closed sources of ionizing α -, β - and γ -radiation (SIR), their service life can be extended in accordance with the procedure established by law. But the analysis of normative and methodical documents revealed the problem of the lack of a method of extending the service life of closed SIRs. It was determined that the decision to extend the service life should be based on facts confirmed by checks (calibration) of the metrological characteristics of the closed SIR during its service life, as well as provide for the determination and establishment of an additional time interval during which this source can be operated. The purpose and tasks of the research are formed in the chapter.

In the second section, the requirements for the method of extending the service life of closed SIRs based on the calibration results were formulated. A mathematical model in the form of a system of inequalities has been developed for the method of extending the service life of closed sources of ionizing radiation based on the analysis of changes in their metrological characteristics during their service life. The analysis of the existing method of calibrating closed SIRs was carried out, and the need for its improvement was determined by adding the process of checking SIRs for tightness. In the section, the method of checking the closed SIR for tightness was developed and the analysis of the components of its uncertainty was carried out.

The need to check the tightness of the SIR before carrying out their calibration is substantiated. The method of checking the tightness of closed SIRs has been developed. To realize this goal, the following tasks are solved in the section: analysis of the method of measuring the activity of radionuclides and calibration of sources, analysis of the components of uncertainty in measuring the activity of radionuclides during the calibration of SIR, development of the principles of the methodology for checking the tightness of sources of ionizing radiation, analysis of the components of uncertainty in checking the tightness of sources, formation of the general uncertainty budget of SIR, estimation of the uncertainty of the calibration results of ionizing radiation sources. The equation of the extended uncertainty of the results of the calibration of closed SIRs was formed, taking into account the tightness test, which made it possible to increase the accuracy of the uncertainty assessment.

In the third chapter, a method of using control charts to control the statistical controllability of the process of changes in the metrological characteristics of a closed SIR is developed. For this, an analysis of the types of control cards was carried out, the feasibility of using control cards of cumulative sums for closed SIRs was determined. They make it possible to take into account the results of previous calibrations of SIR and control the statistical controllability of changes in their metrological characteristics. The principles of construction of control charts of cumulative sums and truncated V-mask are considered. In order to predict the process of changes in the metrological characteristics of closed SIR, a comparative analysis of the application of extrapolation methods was carried out and the use of regression analysis and the method of least squares was proposed. The calibration results for the life cycle of the closed SIR were described by various regression functions. The selection of the function for forecasting, which most accurately described the obtained results, is justified. Taking into account all the obtained results, a method of extending the service life of closed sources of ionizing radiation was developed. Reasonable choice of the period for which the period of operation of the closed SIR is extended.

In the fourth chapter, experimental studies and mathematical modeling of the method of extending the service life of closed SIRs were carried out. An assessment of

the uncertainty of the calibration results was carried out using the example of a closed source of β -radiation ^{137}Cs . The uniformity of the external radiation of closed α -radiation sources was investigated. The simulation of the choice of function was carried out to describe the changes in the activity of the closed SIR according to the calibration results, to predict the service life of the SIR.

Key words: sources of ionizing radiation, ionizing radiation, metrological characteristics, calibration, standard, control chart, method of least squares, metrological support, service life, service life, uncertainty, measurement, regression, calibration laboratory.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Р. Берестов, І. Кравченко, Н. Гоц, В. Паракуда. Огляд системи метрологічного забезпечення спектрометрії іонізуючого α -, β -, γ - випромінення. – Метрологія та прилади. 2019. № 2, С. 28 – 35. DOI: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-22-33 [11].
2. Р. Берестов, Н. Гоц. Дослідження методів вимірювання активності радіонуклідів для калібрування джерел α -, β -, γ - випромінення. - Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 3, С. 14 – 23. DOI: 10.24025/2306-4412.3.2021.243580 [12].
3. Р. Берестов, Н. Гоц. Формування вимог до методики продовження терміну служби закритих джерел іонізуючого випромінення. - Методи та прилади контролю якості. 2021. № 2, С. 22 – 33. DOI: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-22-33 [13].
4. Nataliya HOTS, Krzysztof PRZYSTUPA, Maryna MIKHALEWA, Berestov RUSLAN. Simulation of the influence of multiple reflections of background radiation on the thermography results. - PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. 2022 № 3. 177-120. DOI:10.15199/48.2022.03.27 [14].
5. Natalia Hots, Ruslan Berestov. Use of control charts of cumulative amounts for the method of extending the service life of the ionizing radiation source according to

calibration results. - ITCMTM. 2024; Volume 85(1), Number 1: pp.10-15. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.01.010> [15].

6. Берестов Р., Гоц Н., & Рось Р. (2024). Дослідження метрологічних характеристик джерел альфа-випромінення , що входять до складу вторинного еталону ВЕТУ 12-02-01-98 . MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, (1), 39–44. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-5> [16]

Зміст

Розділ 1 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	17
ЗАКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ	
1.1 Застосування іонізуючого випромінення в промисловості та його вплив на людину	17
1.2 Технічні характеристики джерел іонізуючого випромінення	20
1.3 Еталонна база джерел іонізуючого випромінення	27
1.4 Методи вимірювання активності радіонуклідів	29
1.5 Законодавче та нормативне забезпечення закритих джерел іонізуючого випромінення	38
1.6 Аналіз видів метрологічних робіт, які впливають на встановлення строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення	42
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ	48
ЗАКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ	
2.1 Розроблення вимог до комплексного методу продовження строку служби закритих ДІВ	48
2.2 Аналізування методики калібрування закритих ДІВ	51
2.3 Аналізування складових невизначеності вимірювання активності радіонуклідів при калібруванні закритих ДІВ	55
2.4 Розроблення методики випробування закритих ДІВ на герметичність	60
2.5 Аналізування складових непевності перевірки герметичності закритих ДІВ	62
2.6 Формування розширеної непевності калібрування закритих ДІВ з врахуванням перевірки на герметичність	64
Висновки до розділу 2	64

Розділ 3 РОЗРОБЛЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ ЗАКРИТИХ ДІВ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ КАЛІБРУВАННЯ	66
3.1 Загальні відомості, щодо контрольних карт Шухарта	66
3.2 Вибір карт кумулятивних сум та їх застосування	69
3.3 Методи екстраполяції	75
3.4 Вибір методу екстраполяції та його застосування.	76
Висновки до розділу 3	79
Розділ 4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО МЕТОДУ ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ ЗАКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ	81
4.1 Оцінювання невизначеності результатів калібрування на прикладі закритого джерела β -випромінення 1СО-21	81
4.2 Контроль рівномірності зовнішнього випромінення закритих джерел α -випромінення	83
4.3 Приклади вибору функції для опису змін активності закритого ДІВ за результатами калібрування, для прогнозування строку служби ДІВ	83
Висновки до розділу 4	92

Перелік умовних позначень

ЗДІВ - закриті джерела іонізуючого випромінення

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки

ІВ – іонізуюче випромінення

КККС – контрольна карта кумулятивної суми

СП – спеціалізоване підприємство

РАВ – радіоактивні відходи

РДСП – радіонуклідне джерело спеціального призначення

НПД – напівпровідниковий детектор

СЕГ – спектрометр енергій гамма

ППП – пік повного поглинання

РК – радіаційний контроль

НД – нормативний документ

Розділ 1

АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ

Широке використання радіонуклідів α -, β -, γ - випромінення в атомній енергетиці, медицині, в технологічних процесах та наукових дослідженнях зумовили швидкий розвиток методів і засобів контролю метрологічних характеристик закритих джерел іонізуючого випромінення,

У XX-XXI століттях у світового суспільства зросло занепокоєння щодо можливої несприятливої дії іонізуючого випромінення на здоров'я людей та на живу природу, що може спричинити генетичні мутації, опіки, променеву хворобу, захворювання на рак, виникнення пухлин та смерть. Тому важливим є забезпечення відповідності метрологічних характеристик закритих ДДВ встановленим вимогам.

В розділі проведений аналіз метрологічного забезпечення спектрометрії іонізуючих α -, β -, γ - випромінень та визначення напрямків її розвитку для прикладних завдань.

1.1 Застосування іонізуючого випромінення в промисловості та його вплив на людину

Вид іонізуючого випромінювання, в сенсі енергії, це енергія, що виділяється атомами у формі електромагнітних хвиль (γ -промені чи рентгенівське випромінення) або частинок (α -, β - нейтрони, протони). Радіоактивністю називається спонтанний розпад атомів, а надлишок енергії, що при цьому виникає, це форма іонізуючого випромінення. Радіонукліди - нестабільні елементи, що утворюються при розпаді та випромінюють іонізуюче випромінювання. Розглянемо природу іонізуючого α -, β -, γ – випромінення та його вплив на здоров'я людини.

α -випромінення - іонізуюче корпускулярне випромінювання, що складається з альфа-частинок (ядр гелію), які випромінюються при ядерних

реакціях та перетвореннях чи радіоактивному розпаді. Енергія α -частинок складає порядку декількох MeV та різна для різних радіонуклідів. α -частинки — достатньо масивні, вони роблять потужну іонізацію на своєму шляху, але їх пробіги складають всього декілька десятків мікрометрів, тому α -частинки не проходять навіть через листок паперу. α -випромінення небезпечне, тільки тоді, коли радіоактивний ізотоп попадає в середину організму. Тому важливим є контроль іонізуючого α -випромінення продуктів харчування.

β -випромінення — потік електронів, які рухаються з великими швидкостями, а отже мають значно більшу проникаюча здатність у порівнянні з α -випроміненням. Максимальна енергія β -спектра різних радіонуклідів знаходиться в певному інтервалі від декількох кеВ до декількох MeV. В повітрі пробіг β -частинок може бути декілька метрів, а в біологічній тканині може досягати декількох сантиметрів. Також як джерела α -випромінювання, джерела β -випромінювання становлять більшу небезпеку при потраплянні в середину організму не тільки від продуктів харчування, але й від об'єктів оточуючого середовища та аварійних техногенних об'єктів.

γ -випромінення – це короткохвильове електромагнітне випромінювання, що має набагато більшу енергію ніж рентгенівське випромінення і швидкість, близьку до швидкості світла. Такі промені мають досить високу проникну здатність, значно більшу, ніж α и β -частинки. Затримати їх може лише товста бетонна чи свинцева плита. Енергія γ -випромінення знаходиться в діапазоні від декількох кілоелектронвольт до декількох мегаелектронвольт. Воно є основним вражаючим фактором при дії на організм іонізуючого випромінення.

Згідно досліджень Всесвітньої Організації Охорони Здоров'я вплив іонізуючого випромінення можна класифікувати за такими показниками:

Таблиця 1.1- Класифікація впливів ІВ на людину

Вплив іонізуючого випромінювання	Джерело впливу
Запланований вплив - обумовлений використанням та роботою з джерелами випромінювання з певною метою	Медичне використання випромінювання для діагностики чи лікування пацієнтів, чи використання випромінювання в промисловості чи з метою наукових досліджень
Вплив існуючих джерел - коли вплив випромінювання вже існує і у випадку якого необхідно прийняти відповідні заходи контролю	Вплив радону на робочих місцях, в житлових будинках чи вплив фонового природного випромінювання в умовах навколишнього середовища
Вплив в надзвичайних ситуаціях, обумовлених несподіваними подіями, які передбачають прийняття оперативних заходів	Техногенні катастрофи, ядерні конфлікти, зловмисні дії
Внутрішній вплив ІВ	Радіонукліди поглинаються, вдихаються або по іншому потрапляють в кровообіг. Коли радіонуклід виводиться із організму, внутрішній вплив закінчується, самовільно чи в результаті лікування
Зовнішній вплив ІВ	Відбувається в наслідок зовнішнього випромінювання з відповідного зовнішнього джерела, яке припиняється в тому випадку, коли джерело випромінювання закрито, чи коли людина виходить за межі поля випромінювання

Особливості якими можна охарактеризувати вплив ІВ на організм людини та інші біологічні об'єкти [17, 101]:

- низька енергія ІВ може викликати значні біологічні зміни;
- опромінення α -, β -, γ - ІВ характеризується кумулятивним ефектом;
- Чутливість та реакція на опромінення ІВ у різних органах організму різна. Міжнародною комісією по радіаційному захисту розроблені перерахункові коефіцієнти, які рекомендуються використовувати при оцінюванні дози опромінення різних органів та біологічних тканин [18];

- Ознаки дії ІВ проявляється через деякий час;
- ІВ має генетичний ефект;

- доза та час опромінення основні чинники сили опромінення ІВ.

Систематична доза, що сумарно дорівнює однократній, має менші наслідки, ніж велика одноразова доза.

Всесвітня організація охорони здоров'я для формування заходів безпеки та захисту від впливу ІВ розробила програму радіаційного захисту робітників, пацієнтів та громадськості від небезпеки впливу радіації на здоров'я в існуючих та надзвичайних подіях, яка направлена на забезпечення того, щоб переваги використання радіації переважали будь-який ризик. Мета програми – знаходження способів для захисту здоров'я людини від небезпек іонізуючого випромінювання шляхом підвищення обізнаності людей про потенційні ризики для здоров'я, пов'язаних з ІВ, та про важливість його раціонального і безпечного регулювання. Одним із важливих положень програми є розробка норм, стандартів та інших технічних інструментів та освітніх заходів, забезпечення доступу до технічних експертних ресурсів у всьому світі з метою укріплення потенціалу держав в області рішення всіх задач, пов'язаних із забезпеченням радіаційної безпеки, та реагування на радіаційні надзвичайні ситуації [19].

Розглянемо метрологічне забезпечення джерел іонізуючого випромінювання, а саме технічні, наукові, законодавчі, нормативні та методичні його складові, що дасть можливість виявити проблеми та сформулювати завдання роботи [11].

1.2 Технічні характеристики джерел іонізуючого випромінювання

Джерелами іонізуючого випромінювання (ДІВ) називають фізичні об'єкти, окрім ядерних установок, які містять радіоактивну речовину, або технічні пристрої, що генерують або за певних умов можуть генерувати іонізуюче випромінювання та за походженням поділяються на джерела природного та штучного походження [20]. Галузі, де використовуються штучні ДІВ: ядерна енергетика, наукові дослідження, медицина, промисловість, військово-промисловий комплекс, космічна галузь, рентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналіз, геологія.

Загальну класифікацію ДІВ в залежності від різних класифікаційних ознак сформовано в таблиці 1.2 [21,22,23,24]. Докладніше розглянемо різні види ДІВ. Природними ДІВ є радіоактивні речовини, які знаходяться в земній корі, а також космічні промені. Штучними джерелами іонізуючого випромінювання є штучні радіоактивні ізотопи, рентгенівські установки, прискорювачі заряджених частинок, ядерні реактори тощо.

Таблиця 1.2 - Класифікація ДІВ

Ознака	Різновиди
походження	<ul style="list-style-type: none"> • штучні (антропогенні) • природні
природа	<ul style="list-style-type: none"> • не радіонуклідні • радіонуклідні
будова	<ul style="list-style-type: none"> • відкриті • закриті
радіонуклідний склад	<ul style="list-style-type: none"> • α- випромінювачі • β- випромінювачі • γ- випромінювачі
активністю	<ul style="list-style-type: none"> • високоактивні • низькоактивні
застосування	<ul style="list-style-type: none"> • науково-технічні • медичні • ядерні • промислові • енергетичні
метрологічне призначення	<ul style="list-style-type: none"> • контрольні • еталонні
мобільність	<ul style="list-style-type: none"> • переносні • стаціонарні • пересувні
геометричний розмір	<ul style="list-style-type: none"> • об'ємні • точкові

Можливість потрапляння радіонуклідів, що входять в склад закритих ДІВ, в навколишнє природне середовище, в умовах їх використання на які вони розраховані виключає їх будова. При використанні відкритих ДІВ можливе потрапляння радіонуклідів в навколишнє середовище.

Медичні закриті ДІВ призначені для застосування в медичній практиці з діагностичною, профілактичною та терапевтичною метою. Технологічні ДІВ застосовують в різних технологічних та наукових процесах. Контрольні ДІВ використовуються для перевірки працездатності та налаштування радіаційних, ядерно-фізичних приладів та установок. Еталонні джерела використовуються при метрологічній повірці радіаційної, ядерно-фізичної апаратури.

Стаціонарні закриті ДІВ конструктивно передбачають експлуатацію за весь час роботи на одному місці, для їх розміщення та експлуатації необхідні додаткові технічні системи та засоби, а також спеціально обладнанні приміщення. Пересувні закриті ДІВ зібрані та використовуються на транспортних засобах. Переносні закриті ДІВ, в яких маса та конструкція складових частин дають змогу їх переносити (або за необхідності перевозити, також і в зібраному вигляді) а також використовувати за призначенням в польових умовах чи в приміщеннях на місці проведення робіт (без підсилення захисту приміщень та переобладнання).

В промисловості використовуються радіонуклідні ДІВ як закриті так і відкриті. Закрите джерело іонізуючого випромінювання (ЗДІВ) – радіоактивна речовина, яка повністю упакована в захисну тверду оболонку та упакована в міцну захисну оболонку, щоб запобігти витоку радіоактивної речовини за нормальних умов експлуатації на протязі установленого строку, а також у умовах відмінних від нормальних і є складовою частиною цього джерела. ЗДІВ можуть використовуватися як самостійно, так і входять до складу різних радіонуклідних приладів, застосовуються для технологічного контролю за виробничими процесами.

Для калібрування спектрометрів α -, β -, γ - випромінення, використовують радіонуклідні джерела метрологічного призначення[82]. До радіонуклідних ЗДІВ метрологічного призначення відносяться:

- еталонні радіонуклідні джерела;
- контрольні радіонуклідні джерела.

Таблиця 1.3 – Категорії закритих джерел іонізуючого випромінювання [2]

Категорія ЗДІВ	Приклади ЗДІВ	Відношення активності $(A/D)^{-2}$
1	Прилади та установки з радіонуклідними джерелами для променевої терапії, опромінювальні установки, радіоізотопні термоелектричні генератори,	$A/D > 1000$
2	Джерела для брахітерапії з високими/середніми потужностями дози, радіонуклідні джерела для промислової дефектоскопії,	$1000 > A/D > 10$
3	Прилади для проведення геофізичних досліджень та каротажу, стаціонарні промислові засоби вимірювань, що містять закриті високоактивні джерела,	$10 > A/D > 1$
4	Промислові засоби вимірювання з невисокоактивними джерелами, кісткові денситометри, нейтралізатори статичної електрики джерела з низькими потужностями дози для брахітерапії (за винятком очних аплікаторів та довготривалих імплантантів);	$1 > A/D > 0,01$
5	Прилади для рентгенофлуоресцентного аналізу, джерела для проведення спектрометрії, контрольні джерела та калібрувальні джерела джерела для брахітерапії з низькими потужностями дози у вигляді очних аплікаторів та довготривалих імплантантів; прилади електронного захвату.	$0,01 > A/D$ і $A >$ рівня звільнення від регулюючого контролю

Категорію ДІВ визначає постачальник, власник закритого джерела, або виробник.

A – це величина, що характеризує активність на дату виготовлення ЗДІВ.
D – це величина, що характеризує активність ЗДІВ, яке не перебуває під регулюючим контролем та може призвести до опромінення, якого достатнього для виникнення серйозних наслідків. Числові значення величини D наведені в Додатку 1.

Конструктивно ЗДІВ бувають:

- джерела альфа-випромінювання це підкладки товщиною 1,1 мм, на робочу поверхню яких нанесено шар радіоактивного матеріалу, захищеного плівкою оксиду металу.
- джерела бета-випромінювання це підкладка товщиною $1,5 \pm 0,2$ мм, на робочу поверхню якої нанесений шар радіоактивного матеріалу, захищеного алюмінієвою фольгою.

Номенклатура закритих радіонуклідних джерел спеціального призначення (РДСП), що можуть використовуватися для метрологічного призначення, наведена в таблиці 1.4 [25, 99].

Таблиця 1.4 – Номенклатура закритих радіонуклідних джерел

№	Тип ДІВ	Призначений термін експлуатації	Рівні поверхневих забруднень
1	Джерела альфа-випромінювання із ^{239}Pu , ^{234}U , ^{238}U типів 1П9, 2П9, 3П9, 4П9, 5П9, 6П9, 1У4, 2У4, 3У4, 4У4, 5У4, 6У4, 1У8, 2У8, 3У8, 4У8, 5У8, 6У8	ТУ 95 477-83 2,5 р.	1 Бк при активності до 10^3 Бк 2 Бк при активності радіонуклідів більше 10^3 Бк
2	Спектрометричні альфа- джерела спеціального призначення на основі радіонуклідів: ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{226}Ra , ^{244}Cm , $^{238}\text{Pu}+^{239}\text{Pu}+^{233}\text{U}$, тип ОСАИ	ТУ 95-703-87 3 р.	35 Бк
3	Джерела бета-випромінювання із $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, типів 1СО, 2СО, 3СО, 4СО, 5СО, 6СО,	ТУ 95 477-83 3,5 р.	10 Бк
4	Джерела бета-випромінювання спеціального призначення із ^{60}Co , ^{204}Tl , 1К0, 1Т4	ТУ 95 1000-82 1 р.	0,925 Бк

№	Тип ДІВ	Призначений термін експлуатації	Рівні поверхневих забруднень
5	Спектрометричні рентгенівські та гамма-джерела спеціального призначення типу СОИРИ, ОСГИ на базі радіонуклідів ^{88}Y , ^{113}Sn , ^{139}Ce , ^{241}Am , ^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{54}Mn , ^{207}Bi , $^{44}\text{Ti}+^{44}\text{Sc}$, ^{22}Na , ^{60}Co та інші.	ТУ 7018-001-13805076-03 ТУ-17-03-88 3 р. 5 р. 12 р.	20 Бк (по герметичності) 100 Бк або 185 Бк
6	Джерела гамма-випромінювання із ^{226}Ra , (маси ^{226}Ra) типів РА, ER та аналогічних	МРТУ-10-43-64 ОСТ 95-855-80 10 р.	185 Бк
7	Джерела гамма-випромінювання із ^{137}Cs , тип ИГИ-Ц тип ГС та інших типів	ТУ 95.957-82 5 р. 7 р.	185 Бк (1850 Бк кислотної витяжки)
8	Джерела гамма-випромінювання із ^{60}Co , типу ГИК, ГСО та інших типів	ТУ 95.7167-76 10 р.	185 Бк (1850 Бк кислотної витяжки)
9	Джерела гамма-випромінювання із ^{241}Am , тип ИГИА та інших типів	ТУ 95.956-84 12 р.	185 Бк (1850 Бк кислотної витяжки)

Галузі використання штучних джерел іонізуючого випромінювання наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Типові галузі використання ДІВ

№	Області застосування закритих джерел іонізуючого випромінювання
1	Промислова радіографія: <ul style="list-style-type: none"> • ЗДІВ використовується в блоці джерела • ЗДІВ використовується поза блоком джерела
2	Медицина: <ul style="list-style-type: none"> • радіографія • телетерапія • внутрішньопорожнинні аплікатори • поверхневі аплікатори
3	Прилади та установки з джерелами гамма-випромінювання: <ul style="list-style-type: none"> • ЗДІВ використовується в блоці джерела • ЗДІВ використовується поза блоком джерела

№	Області застосування закритих джерел іонізуючого випромінювання
4	Прилади з бета-джерелами та низькоенергетичними гамма- та рентгенівськими випромінюваннями для флуоресцентного аналізу (за виключенням джерел, наповнених газами)
5	Каротаж бурових свердловин
6	Переносні щільноміри і вологоміри
7	Нейтронні ЗДІВ загального призначення
8	Контрольні джерела з активністю понад 1,1 МБк
9	Радіаційні гамма-установки: <ul style="list-style-type: none"> • ЗДІВ використовується в блоці • ЗДІВ використовується поза блоком джерела
10	Генератори іонів: <ul style="list-style-type: none"> • нейтралізатори • детектори диму • хроматографи

До основних метрологічних характеристик ДІВ відносяться:

- період напіврозпаду;
- активність радіонукліду.

Активність ДІВ – це фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості розпадів за секунду. Одиниця активності в СІ – бекерель. Активність джерела можна визначити за допомогою спектрометрів, а також за допомогою розрахунку за піврозпадом від значення вказаному в паспорті джерела.

Період піврозпаду $T_{1/2}$ – це фізична величина, що рівна часу, на протязі якого розпадеться половина наявної кількості. В кожного радіонукліда свій період піврозпаду.

ЗДІВ завозяться в Україну з-за кордону, тому що в нашій країні виробляються лише окремі екземпляри.

Основними метрологічними характеристиками ЗДІВ є активність радіонукліда та період напіврозпаду.

1.3 Еталонна база джерел іонізуючого випромінення

В Україні створено десять Державних первинних еталонів, для забезпечення єдності вимірювань ЗДІВ [26, 79, 94], зокрема:

- державний первинний еталон одиниці активності радіонуклідів;
- державний первинний еталон одиниці об'ємної активності радону-222;
- державний первинний еталон одиниць потужності поглинутої та еквівалентної доз нейтронного випромінення;
- державний первинний еталон одиниці потоку та густини потоку нейтронів;
- державний первинний еталон одиниць поглинутої дози, потужності поглинутої дози рентгенівського та γ -випромінень;
- державний еталон одиниць експозиційної дози, потужності експозиційної дози рентгенівського і γ -випромінень;
- державний первинний еталон одиниць об'ємної активності альфа-випромінюючих аерозолів;
- державний еталон одиниць еквівалентної дози, потужності еквівалентної дози рентгенівського та γ -випромінень;
- державний первинний еталон одиниць об'ємної активності бета-випромінюючих аерозолів;
- державний первинний еталон одиниць об'ємної активності гамма-випромінюючих аерозолів.

Зберігаються державні первинні еталони в ННЦ «Інститут метрології» [27, 88].

Для обліку і контролю закритих ДІВ створено Державний реєстр джерел іонізуючого випромінювання [28,29] – це державна система обліку ЗДІВ, з якими діяльність не звільняється від регулюючого контролю та які ввезені чи вивезені через державний кордон, або вироблені на території України, а також власників цих ЗДІВ, юридичних і фізичних осіб, за якими ЗДІВ закріплені на праві оперативного управління або повного господарського відання чи знаходяться у їх володінні та користуванні на інших підставах. Реєстр створено для здійснення обов'язкової державної реєстрації ЗДІВ для забезпечення обліку ЗДІВ та

контролю за знаходженням та переміщенням ЗДІВ, проведенням аналізу їх якісного і кількісного складу (крім ЗДІВ, які є у ЗСУ), прогнозування їх обсягів обслуговування, накопичення, потреби у виробничих потужностях підприємств - виробників ЗДІВ та спеціалізованих підприємств (СП) по поводженню з радіоактивними відходами(РАВ).

Засоби вимірювання, що вимірюють спектри випромінення, називають спектрометрами [30], з використанням яких визначають енергію кожної частинки, число частинок, визначають тип радіонукліда. За даними експерименту будують графіки функції $\psi(E)$ чи $f(E)$, які і є спектрами випромінень, нормованих на одиницю чи на повне число частинок.

Робочі засоби вимірювання ІВ -це спектрометри, пристрої, які дозволяють вимірювати розподіл іонізуючого випромінення за видами ІВ та енергією. Спектрометр дає можливість виявити в суміші радіонуклідів за характерною енергією присутність конкретних радіоізоотопів. Характеристики різних типів спектрометрів основних світових виробників подані в таблиці 1.6

Таблиця 1.6 - Характеристики різних типів спектрометрів світових виробників

Вид спектрометра	Назва спектрометра	Виробник	Діапазон енергії, кеВ	Інтегральна нелінійність
Спектрометр α – випромінення	SOLOIST	Ortec, США	10-9000	$\pm 0,1 \%$
	ALPHA ANALYST	CANBERRA INDUSTRIES, Inc, США	0-10000	$\pm 0,1 \%$
	ALPHA $\alpha 2$	BALTIC SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Латвія	3000-8000	$< 0,04 \%$
	TRIO (α -канал)	BALTIC SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Латвія	1500-10000	$\pm 0,04 \%$

Вид спектрометра	Назва спектрометра	Виробник	Діапазон енергії, кеВ	Інтегральна нелінійність
Спектрометр β – випромінення	TRIO (β -канал)	BALTIC SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Латвія	65-4000	$\pm 2\%$
	СЕБ-01-150	НВП “АКП”, Україна	100-3500	$< 1,5\%$
	СЕБ-01-70	НВП “АКП”, Україна	1000-3500	$< 1,0\%$
	МКС-АТ1315 (β -канал)	АТОМТЕХ, Білорусь	150-3500	$\pm 2\%$
Спектрометр γ – випромінення	СЕГ-001 “АКП-С”-63	НВП “АКП”, Україна	100-3000	$< 1,0\%$
	СЕГ-05	“Еталон”, Україна	50-3000	$< 1,0\%$
	TRIO (γ -канал)	BALTIC SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Латвія	40-3000	$\pm 1,0\%$
	МКС-АТ1315 (γ -канал)	АТОМТЕХ, Білорусь	50-3000	$\pm 2\%$

Перелік акредитованих випробувальних та калібрувальних лабораторій джерел іонізуючого випромінення поданий в [31].

1.4 Методи вимірювання активності радіонуклідів

Методи визначення параметрів іонізуючого поділяються на радіометричний (визначають сумарні активності радіоактивних речовин), дозиметричний (визначають інтенсивність ІВ, їх вплив на біологічні тканини та матеріали), та спектрометричний методи [12, 83].

Для визначення питомої активності, активності окремих видів радіонуклідів, їх радіонуклідного складу, дослідження джерел випромінення, періоду напіврозпаду, певних радіонуклідів використовують саме спектрометричний метод. Коли при β - розпаді ІВ має безперервний розподіл за енергією, то ІВ характеризують максимальною чи середньою енергією.

Класифікація методів вимірювання активності ІВ подана в таблиці 1.7, [30,32].

Таблиця 1.7 - Методи вимірювання активності радіонуклідів

№	Назва методу	Фізичний принцип
1	Метод абсолютного рахунку іонізуючих частинок	Вимірювання активності радіонуклідів, допомогою відповідного детектора числа іонізуючих часток, що випускаються ЗДІВ всередині даного тілесного кута за певний інтервал часу
2	Метод 4π (2π) рахунку	Абсолютний рахунок іонізуючих частинок, за допомогою 4π (2π) - детектора
3	Метод обмеженого тілесного кута	Абсолютний рахунок іонізуючих частинок, за допомогою лічильника, що реєструє іонізуючі частинки всередині тілесного кута, обмеженого діафрагмою
4	Метод внутрішнього наповнення	Абсолютний рахунок заряджених частинок, за допомогою введення радіоактивного зразка в газовій або рідкій фазі в детектор внутрішнього наповнення
5	Метод внутрішнього газового наповнення	Внутрішнє наповнення, за допомогою введення газового радіоактивного зразка в газовий іонізаційний детектор внутрішнього наповнення
6	Метод внутрішнього рідинного наповнення	Внутрішнє наповнення, за допомогою введення рідкого радіоактивного зразка в рідинний сцинтиляційний детектор.
7	Метод трьох наповнень	Абсолютний рахунок фотонів характеристичного випромінювання електронно-захватних радіонуклідів, за допомогою газорозрядного 4π -лічильника, наповнюється послідовно газом з додаванням двох різних кількостей важкого інертного газу
8	Електростатичний метод вимірювання активності радіонуклідів	Абсолютний рахунок заряджених частинок, шляхом вимірювання електричного заряду, який виникає в ДІВ у результаті вильоту з нього заряджених часток, які випускаються при ядерному перетворенні.

№	Назва методу	Фізичний принцип
9	Метод збігів заряджених частинок і фотонів	Збіги, які здійснюються за допомогою роздільної реєстрації фотонів та заряджених частинок, які випускаються ДІВ, у поєднанні з рахунком тимчасових збігів між ними
10	Індикаторно-екстраполяційний метод	Вимірювання активності бета-випромінюючих радіонуклідів за допомогою додавання до даного радіонукліду відомої кількості гамма-бета-випромінюючого радіонукліда – індикатора.

Основні вимоги до методів, які застосовуються для вимірювання активності ЗДІВ під час калібрування є:

- висока точність;
- простота їх технічної реалізації.

Цими характеристиками наділені іонізаційний та сцинтиляційний методи.

Сцинтиляційний метод вимірювання активності радіонуклідів

Сцинтиляційний метод [30] - це метод в основу якого покладено аналізування сцинтиляцій. Вони з'являються в деяких речовинах під час взаємодії цих речовин з ІВ. На даний момент отримано багато речовин, з такими властивостями. Їх розділяють: за фізичним станом - на газоподібні, тверді та рідкі за хімічним станом - на неорганічні та органічні.

Головною властивістю сцинтиляторів є невеликий час висвічування. В неорганічних сцинтиляторах загальний час спалаху становить приблизно 10^{-7} с. Ще менше часу необхідно для органічних сцинтиляторів: 0,0000001-0,00000001 с. Інша особливість - це пропорційність між інтенсивністю спалаху та енергією, яка втрачена квантом чи іонізуючою часткою в сцинтиляторі. Важливо ще й те, що є можливість виготовляти сцинтилятори великих розмірів і потрібної форми. Це дає змогу створювати сцинтиляційні детектори різного призначення. У α -спектрометрії обмежена можливість використання сцинтиляторів монокристалами CsI (Tl). Як правило застосовують тонкі монокристали для зменшення фону від γ - і β -випромінень.



Рисунок 1.1 - . Вигляд сцинтиляторів

Через сильне відбиття від поверхні сцинтиляторів електронів, сильно обмежені можливості в β -спектрометрії сцинтиляторів. Ця властивість характерна для неорганічних кристалів. Тому переважно використовують органічні кристали стільбена та антрацена[86]. Інколи використовують рідинні сцинтилятори, наприклад для вимірювання низькоенергетичних спектрів β -випромінювачів (^{14}C , ^{35}S , ^3H).

Найуспішнішим виявилось використання сцинтиляторів для спектрометрії γ -випромінювання. Частіш за все використовують кристал NaI (Tl) . З інших неорганічних сцинтиляторів використовують CsI (Tl) , частіш за все в спектрометрії низькоенергетичного γ - та рентгенівського випромінювання.

Рідинні сцинтилятори використовують для вимірювання спектрів γ -випромінювання високих енергій, оскільки на їх основі можливо створити детектори великих розмірів. Сцинтиляційні спектрометри – це спектрометри, що можуть вимірювати відносну інтенсивність, енергію, та зовнішнє випромінювання.



Рисунок 1.2 - Альфа спектрометр СЕА.



Рисунок 1.3 - Сцинтиляційний гама-бета-спектрометр МКС-АТ1315

Іонізаційний метод вимірювання активності радіонуклідів

Іонізаційний метод [32] заснований на вимірюванні іонізаційного ефекту. Цей ефект виникає при взаємодії з ним іонізуючого випромінювання в чутливому об'ємі детектора. Як правило використовують три види іонізаційних детекторів: пропорційний лічильник, імпульсна іонізаційна камера з сіткою, та напівпровідниковий детектор. Чутливий об'єм пропорційного лічильника та

іонізаційної камери заповнюють робочим газом, який складається з метану та інертного газу. У напівпровідниковому детекторі (НПД) створюють чутливу область, де немає вільних носіїв заряду. Заряджена частинка викликає іонізацію потрапляючи в цю область. Отже в у валентній зоні з'являються дірки, а зоні провідності - електрони. Дія напруги, яка прикладена до нанесеної на поверхню чуттєвої зони електродів, викликає рух дірок та електронів, що призводить до створення імпульсу струму. Напруга прикладена до напівпровідникового кристалу в декілька кВ, забезпечує збір всіх зарядів, що утворені частинкою в об'ємі детектора.

Для реєстрації заряджених частинок використовують детектори з надчистого германію (HPGe) та кремнієві детектори. У кремнієвих детекторів чутлива область товщиною до 5 мм, ця область відповідає пробігу протонів з енергією ~ 30 MeV та альфа частинок з енергією ~ 120 MeV. А для германію тієї ж товщини пробіг протонів і альфа частинок з енергіями ~ 40 MeV і ~ 160 MeV відповідно. Для германієвих детекторів є можливість виготовляти детектори з більш товстою чутливою областю.

Для всіх іонізаційних детекторів, є необхідна умова, щоб пробіг заряджених частинок повністю укладався в чутливій області. Саме тоді існує прямий зв'язок між енергією частинки та амплітудою вихідного сигналу.

Але це не розповсюджується на γ -детектори, так як взаємодія γ -випромінювання з речовиною чутливого об'єму таких детекторів здійснюється за допомогою фотоефекту, комптонівського ефекту та ефекту утворення пар.

Спектрометри з іонізаційними детекторами використовують для α -, β - і γ -спектрометрії. Спектрометри з іонізаційними камерами використовують для вимірювання енергетичного розподілення α -випромінювання. Для β -спектрометрії, а також для спектрометрії рентгенівського та низькоенергетичного γ -випромінювання використовують спектрометри з пропорційним лічильником. Поверхнево-бар'єрні кремнієві детекторами використовуються як правило в спектрометрії α -випромінювання.



Рисунок – 1.4. Спектри напівпровідникового спектрометра

Германієві детектори володіють високими технічними параметрами, що дозволило створити γ -спектрометри.

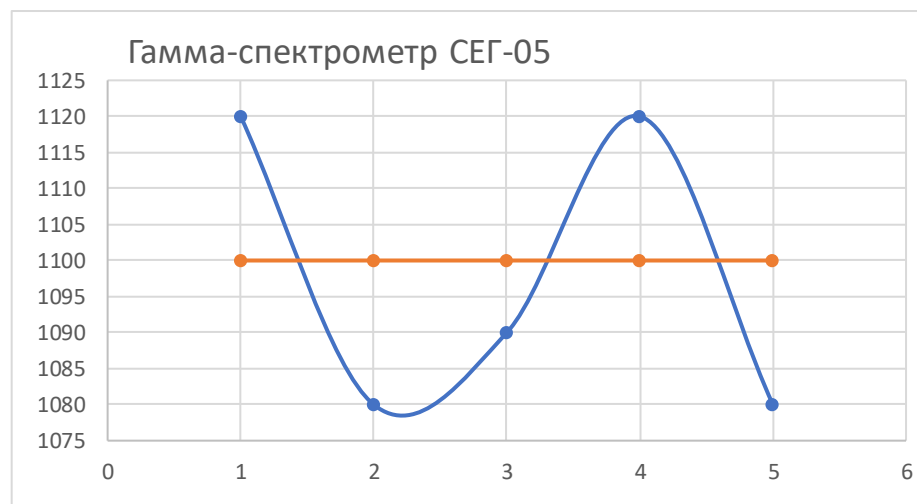
З розглянутих нами спектрометрів найбільш широке практичне застосування отримали спектрометри зі сцинтиляційними і напівпровідниковими детекторами. НПД спектрометрія має певні переваги в порівнянні з іншими: невисокий рівень енергії, що витрачається на утворення пари електрон-дірка в германії та кремнії – близько 3 еВ; високі коефіцієнти поглинання (вищі, ніж у газах; але менші, ніж у сцинтиляторах NaI(Tl), CsI(Tl)), що дало змогу в досить тонкому шарі повністю поглинути енергію іонізуючої частинки; висока рухливість носіїв заряду що дало змогу уникнути труднощів з реєстрацією частинок, котрі проникають в різну глибину в чутливу зону детектора; за розподіленням НПД кращі ніж сцинтиляційні спектрометри, що дало можливість отримати весь спектр одночасно, та забезпечує вищу оперативність набору статистики і, відповідно, швидкість у роботі[92].

Порівняння результатів вимірювання активності радіонуклідів сцинтиляційним та напівпровідниковим методами

На рисунку 1.5 показані результати вимірювання активності радіонуклідів за допомогою сцинтиляційного методу. Невизначеність результатів вимірювання склала 7,06%, що є задовільним для цього методу. На рисунку 1.6 показані результати вимірювання активності радіонуклідів за допомогою іонізаційного методу. Невизначеність результатів вимірювання становить 7,14%, що теж відповідає вимогам точності.

Результати отримані під час експерименту доводять те, що сцинтиляційний та іонізаційний методи вимірювання активності найоптимальніші при застосуванні для калібрування ЗДІВ, так як невизначеність результатів вимірювання проведених за допомогою цих методів є одного рівня і не перевищують 7,5%, то отримані результати відповідають заданим значенням невизначеності до 10%.

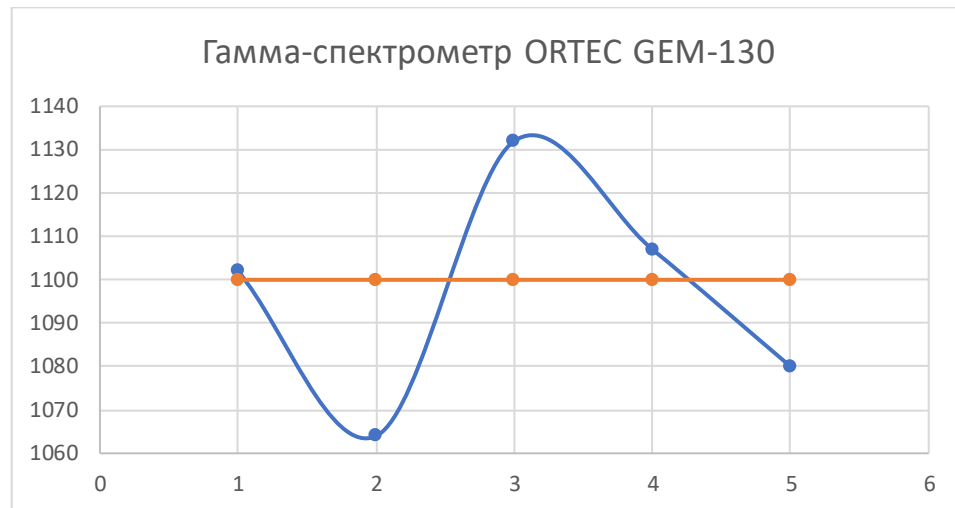
Питома активність Бк/кг



Номер вимірювання

Рисунок 1.5 - Результати вимірювання сцинтиляційним методом

Питома активність Бк/кг



Номер вимірювання

Рисунок 1.6 - Результати вимірювання іонізаційним

В результатів всіх розглянутих фактів приходимо висновку, що розглянуті методи найбільш оптимальні для використання при калібруванні джерел α -, β -, γ – випромінювання. Для НПД методу притаманна висока розподільна здатність, тобто здатність приладу розділяти дві поряд розташовані на енергетичній шкалі групи моноенергетичного випромінювання одного роду. Фізична сутність цього параметра – це мінімальна різниця в енергіях двох моноенергетичних груп фотонів або частинок, що розрізняються по спектру, це дає змогу точніше визначати активності різних видів радіонуклідів в зразку. Для практичного застосування - це є перевагою даного методу. Сцинтиляційний метод характерний високою ефективністю реєстрації, зокрема відношення числа частинок енергії, які зареєстровані в піці повного поглинання(ППП) за одиницю часу, до зовнішнього випромінювання джерела, який встановлений на фіксованій та заданій відстані від детектора. Перевагою даного методу є можливість точнішого визначення характеристики моноенергетичного піку окремого радіонукліду в зразку.

1.5 Законодавче та нормативне забезпечення закритих джерел іонізуючого випромінення

До 1991 року в Україні практично була практично відсутня законодавча база, що регулювала б відносини у сфері використання іонізуючого випромінення. Були ратифіковані такі документи:

- «Конвенція про оперативне сповіщення про ядерну аварію»;
- «Конвенція про допомогу в разі ядерної аварії чи радіаційної аварійної ситуації».

З 1991 року в Україні створена законодавча база, яка регулює питання у сфері використання ядерної енергії і радіаційної безпеки. Україна стала учасницею таких міжнародних договорів:

- «Конвенція про фізичний захист ядерного матеріалу»[33];
- «Договір про нерозповсюдження ядерної зброї»[34];
- «Віденська Конвенція про цивільну відповідальність за ядерну шкоду»[35];
- «Конвенція про ядерну безпеку»[36];
- «Угода між Україною та Міжнародним агентством з атомної енергії про застосування гарантій у зв'язку з договором про нерозповсюдження ядерної зброї»[37];
- «Спільний протокол про застосування Віденської конвенції та Паризької конвенції»[38].

Приєднання або ратифікація до кожного міжнародного договору супроводжувалося упорядкуванням національного законодавства. Тому на даний час в Україні правовою базою з питань радіаційної безпеки та законодавчою основою метрологічного забезпечення закритих джерел іонізуючого випромінення є:

- Закон України “Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання”[20];
- Закон України “Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку”[39];

- Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища”[40];
- Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)[41];
- Правила ядерної та радіаційної безпеки при перевезенні радіоактивних матеріалів (ПБПРМ-2006)[42].

В ЗУ «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» зазначено, що ядерна безпека – дотримання правил, умов, стандартів та норм використання ядерних матеріалів, які забезпечують радіаційну безпеку. Радіаційна безпека – це дотримання радіаційного впливу в допустимих межах на населення, персонал і навколишнє середовище, встановлених стандартами, правилами та нормами з безпеки.

Для населення України радіаційна безпека забезпечується такими діями:

- умови життєдіяльності людей, відповідають вимогам чинних правил та норм радіаційної безпеки;
- встановленням обмежень на опромінення з різних джерел випромінювання;
- організацією радіаційного контролю(РК);
- проведення заходів та ефективністю планування з радіаційного захисту у випадку радіаційної аварії та в нормальних умовах;
- створенням інформаційної системи про радіаційну обстановку.

Законодавство України в галузі забезпечення радіаційної безпеки є в стані постійного розвитку та активного вдосконалення, характеризується наявністю різних за галузевою спрямованістю та формою нормативно-правових документів. Важливим є взаємоузгодження цих документів на основі пріоритету безпеки життя і здоров’я людини, а також охорони навколишнього природного середовища від радіоактивного забруднення.

Сьогодні в Україні є ряд нормативних документів, що регламентують метрологічне забезпечення спектрометрії іонізуючого випромінювання та ДІВ. У 2014 році згідно з Законом України "Про стандарти, технічні регламенти та процедури оцінки відповідності"[43] та на виконання статті 56 Угоди про

асоціацію між Європейським союзом, з однієї сторони, та Україною, , з іншої сторони, методом підтвердження було прийнято декілька міжнародних нормативні документів, як національних стандартів України, з поміж них кілька стандартів в області спектрометрії ІВ (Таблиця 1.8).

Таблиця 1.8 – Нормативні документи спектрометрії іонізуючого випромінення

Номер	Назва
ДСТУ ІЕС 61976:2014	Ядерне приладобудування. Спектрометрія. Визначення характеристик фону спектра в HPGe гамма-спектрометрії (ІЕС 61976:2000, IDT) [44]
ДСТУ ІЕС 62139:2014	Ядерне приладобудування. Дозиметри гамма-випромінювання радіаційні переносні та спектрометри, використовувані для розвідувальних робіт. Визначення, вимоги та калібрування (ІЕС 62139:1993, IDT) [45]
ДСТУ ІЕС 61275:2007	Прилади радіаційного захисту. Виявлення окремих радіонуклідів у навколишньому середовищі. In situ фотонна спектрометрична система із застосуванням германієвого детектора (ІЕС 61275:1997, IDT) [46]
ДСТУ ІЕС 61145:2014	Калібрування та використання систем з іонізаційною камерою для аналізування радіонуклідів (ІЕС 61145:1992, IDT) [47]
ДСТУ ISO 10703-2001	Захист від радіації. Визначання об'ємної активності радіонуклідів методом гамма-спектрометрії з високою роздільною здатністю (ISO 10703:1997, IDT) [48]
ДСТУ ISO 14850-1:2014	Ядерна енергія. Вимірювання активності упаковок відходів. Частина 1. Гамма-спектрометрія з високою роздільною здатністю в інтегральному режимі з відкритою геометрією (ISO 14850-1:2004, IDT) [49]
ДСТУ ISO 18589-4:2015	Вимірювання радіоактивності у довкіллі. Грунт. Частина 4. Вимірювання ізотопів плутонію (плутонію 238 та плутонію 239+240) методом альфа-спектрометрії (ISO 18589-4:2009, IDT) [50]

Наказом ДП «Укр НДНЦ» від 01 січня 2019 року “Про скасування національних стандартів, які розроблені на основі міждержавних стандартів, що

розроблені до 1992 року, та міждержавних стандартів в Україні, що розроблені до 1992 року” були відмінені ряд стандартів, серед них ряд по спектрометрії. Це створило передумови для розроблення нових стандартів в цій області, зокрема на методи калібрування. У окремих видах метрологічної діяльності, зокрема, при акредитації калібрувальних та випробувальних необхідно надавати звіти про результати вимірювання з визначенням їх невизначеності. А отже питання, що пов’язані з визначенням методів та видів оцінювання результатів вимірювання ЗВТ, відносять до важливих науково-технічних задач, актуальність полягає саме у гармонізації вітчизняних нормативних документів в галузі метрології з європейськими щодо переходу на непевність вимірювання.

Розглянемо процедури оцінки відповідності закритих джерел іонізуючого випромінювання на вимоги технічних регламентів.

Згідно з технічним регламентом ЗДІВ строк служби закритих ДІВ – це встановлений виробником строк використання конкретного ЗДІВ з моменту його виготовлення, при закінченні його терміну служби використання такого джерела повинне бути зупинене[2]. В разі підтвердження факту збереження радіаційних характеристик, відсутності дефектів та герметичності, їх ознак на ЗДІВ його строк служби може бути продовжений в установленому законодавством порядку. Але технічному законодавстві, прогалина в цьому питанні. Законодавство не регламентує умови подовження строку служби, і як наслідок тривалість їх експлуатації.

Строк служби ЗДІВ встановлює виробник.

Рішення про продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінювання може бути прийняте на основі інформації про результати попередніх калібрувань, які проводилися впродовж строку служби закритих ДІВ та опрацювання інформації про калібрування.

Отже, доцільне розроблення методу продовження строку служби на основі результатів процедури калібрування протягом строку служби закритого ДІВ.

Існуюча методика калібрування передбачає лише метрологічну перевірку значення активності закритих ДІВ, але не передбачає перевірки на герметичність, що регламентовано міжнародними нормативними документами.

Тому актуальним є вдосконалення методики калібрування ДІВ шляхом впровадження процедури перевірки герметичності закритого джерела іонізуючого випромінювання. При цьому необхідним є врахування додаткових складових невизначеності калібрування, що виникають в процесі перевірки герметичності ЗДІВ. [25,51].

1.6 Аналіз видів метрологічних робіт, що впливають на встановлення строку служби ЗДІВ

Отже, ЗДІВ – це широкий спектр ЗВТ, який широко застосовується в промисловості. Якщо щодо продовження строку служби ЗДІВ, може бути підтверджений факт збереження герметичності, відсутності дефектів та їх ознак, а також радіаційних характеристик, це дозволить продовжити безпечно їх використання в різних галузях господарки та принесе економічний ефект за рахунок продовження використання ЗДІВ та зменшення витрат на утримання та зберігання протермінованих ЗДІВ, а саме:

- витрат на закупівлю нових ДІВ за кордоном;
- витрат при постановці нових ДІВ на облік.
- витрат, що супроводжуються зберіганням та/або захороненням на СП з поводження з РАВ;

Розглянемо шляхи, що можуть бути використані для встановлення та продовження строку служби ЗДІВ. Кожне окреме ЗДІВ має обмежений та визначений строк служби. Наступні процедури впливають на тривалість експлуатації протягом строку служби ЗДІВ:

- встановлений виробником строк служб ЗДІВ, який рахується з моменту виготовлення;
- отримані результати оцінювання відповідності ЗДІВ вимогам технічних регламентів протягом строку служби;

- отримані результати калібрування ЗДІВ протягом строку служби.

Встановлення строку служби ЗДІВ.

Протягом установленого строку служби ЗДІВ за належних умов експлуатації необхідно, щоб виконуватися наступні технічні вимоги:

- ЗДІВ повинні мати конструкцію, яка забезпечує радіаційну безпеку в місцях зберігання та експлуатації, і наявність реєстраційного номера на джерелі та його контейнері;

- виготовлення ЗДІВ відповідно до технічних умов та стандартів на конкретний тип закритого джерела;

- ЗДІВ мають бути герметично закритими;

- відповідність ЗДІВ своєму призначенню і основним технічним вимогам.

Спираючись на ці вимоги встановлений термін служби джерела має бути :

- не менше двох періодів напіврозпаду – для ЗДІВ на основі радіонуклідів з періодом напіврозпаду менше пів року;
- не менше одного періоду напіврозпаду (але не менше 1 року) – для джерел на основі радіонуклідів з періодом напіврозпаду від пів до п'яти років;
- не менше п'яти років – для джерел нейтронного та гамма-випромінень на базі радіонуклідів з періодом напіврозпаду п'ять і більше років.

Для джерел рентгенівського альфа-, і бета- випромінень з періодом напіврозпаду п'ять і більше років призначений строк служби встановлюють у НД на конкретний тип джерела [41].

Виходячи з вище описаного термін служби ЗДІВ встановлюється виробником з дня виготовлення, і вказує на те, що протягом цього строку виробник гарантує безпеку ЗДІВ і несе юридичну та фінансову відповідальність за недоліки, що виникли з його вини. Ці гарантії діють за умови, що ЗДІВ використовується за призначенням.

Процедура оцінки відповідності ЗДІВ. Оцінку відповідності ЗДІВ вимогам «Технічного регламенту модулів оцінки відповідності» [52] та «Технічного регламенту закритих джерел іонізуючого випромінювання» [2]

з подальшою видачою сертифіката відповідності з вказанням терміну дії сертифіката.

Обрають процедуру оцінки відповідності в залежності від категорії ЗДІВ (таблиця 1.8) та проводять відповідно до Технічного регламенту (ТР) модулів оцінки відповідності і вимог до маркування національним знаком відповідності застосовуючи один з модулів або їх комбінації Таблиця 1.9. При цьому виробник, постачальник або власник ЗДІВ визначає категорію джерела.

Технічна документація на ЗДІВ, що подається виробником або уповноваженою ним особою, має містити:

- вимоги до конструкції ЗДІВ;
- умови щодо експлуатації, технічного обслуговування та ремонту;
- перелік заходів забезпечення безпеки, зберігання та використання ЗДІВ;
- вимоги щодо кваліфікації персоналу, що працюватиме з ДІВ;
- фотокартки ЗДІВ, контейнера, та його транспортувальної упаковки.

Таблиця 1.9 - Перелік модулів оцінки відповідності закритих джерел вимогам Технічного регламенту [52]

Категорії закритих ДІВ	Модулі оцінки відповідності закритих ДІВ
1	A1* або C+B, або C1+B, або C2+B, або E+B, або B, або F+B, або B, або G, або H, або H1
2	A1* або C+B, або C1+B, або C2+B, або E+B, або B, або F+B, або B або G
3	A1* або C+B, або C1+B, або C2+B, або D+B, або D1+B, або E+B, або B, або F+B, або B, або G
4	A1 або B, або C+B, або C1+B, або C2+B, або D+B, або D1+B, або E+B, або B, або F+B, або B
5	A або A1, або B, або C+B, C1+B, або C2+B, або D, або D+B, або D1+B, або E, або E+B, або B

*Для ЗДІВ, виготовлених на замовлення або малою партією.

Процедура випробувань ДІВ метрологічного призначення включає в себе:

- реєстрацію ДІВ, що надані та супровідної технічної документації;
- експериментальні дослідження, що мають на меті комплексну оцінку технічного стану ДІВ;
- відповідність отриманих результатів контролю вимогам технічної та нормативної документації;
- оформлення документів встановленої форми на ДІВ із зазначенням додаткового строку служби.

Отже, термін дії сертифіката діє в межах строку служби ДІВ, та показує, що на протязі його дії всі метрологічні і технічні характеристики ДІВ відповідають вимогам технічного регламенту і використання джерела є безпечним.

Калібрування ЗДІВ. Калібрування ЗДІВ в Україні відбувається згідно із затвердженою методикою [51,53], що поширюється на ДІВ закритого типу, які використовуються як міри активності або потоку частинок, а також РДСП, які використовуються як міри активності, об'ємної активності або питомої активності. Метрологічні характеристики, ДІВ вимірюють за допомогою компаратора методом заміщення джерела, яке калібрують, еталонним джерелом, одного типу з вимірюваним, в ідентичних геометричних умовах з однаковою площею робочої поверхні. Основою методу є вимірювання швидкості лічення імпульсів від джерела, що калібрується та від еталонного джерела, при багаторазовій зміні цих джерел. Проведення калібрування передбачає наступні операції:

- зовнішній огляд ДІВ;
- перевірка відсутності нефіксованого забруднення джерел радіоактивними речовинами;
- опробування ДІВ;
- визначення активності, питомої (об'ємної) активності радіонуклідів ДІВ, потоку частинок в кут 2π ;

- опрацювання результатів вимірювань та розрахунок розширеної невизначеності;
- видача сертифіката калібрування.

Результати калібрування за затвердженою в Україні методикою підтверджують лише факт збереження радіаційних характеристик ЗДІВ та відсутність ознак дефектів на ньому. В той же час не підтверджують факт герметичності джерела а також відсутності дефектів. Отже, можемо зробити висновок, що існуюча в Україні методика калібрування закритих ДІВ не дозволяє приймати рішення про продовження терміну експлуатації.

Висновки до розділу 1.

Згідно нормативно-правового документу України «Технічного регламенту закритих джерел іонізуючого випромінювання» за умови збереження радіаційних характеристик, герметичності та відсутності дефектів ЗДІВ, їх строк служби може бути продовжений в установленому законодавством порядку [2]. Строк служби – це календарний строк протягом якого виробник гарантує безпеку та несе відповідальність за істотні недоліки, що виникли з його вини [2].

На сьогодні основним документом, який регламентує продовження «терміну експлуатації» ДІВ, є Методика випробувань МВ 12-01:2014 ДП «КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ «Інструкція з технічного обслуговування джерел іонізуючого випромінювання». Цей документ регламентує технічне обслуговування джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) та поширюється на закриті радіонуклідні джерела (ЗРД) альфа-, бета-, гамма-, рентгенівського випромінювання метрологічного призначення (МП) з закінченим паспортним терміном експлуатації. Інструкція встановлює зміст і методику проведення випробувань джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) для визначення їх технічних, характеристик та перевірки на герметичність з метою подовження їх призначеного терміну експлуатації.

Але необхідно зазначити, що рішення про продовження строку служби має базуватися на фактах, які підтверджені метрологічними перевірками протягом

строку служби, а також передбачати визначення та встановлення додаткового часового інтервалу, протягом якого це джерело може експлуатуватися.

Методика випробувань МВ 12-01:2014 пропонує визначати цей часовий інтервал за показниками надійності на основі статистичного опрацювання властивостей вибірок джерел іонізуючого випромінення. Тривалість подовженого «терміну експлуатації» ДІВ та «граничного терміну експлуатації» ДІВ визначається відповідно до алгоритму оцінки показників надійності вибірки аналогічних джерел іонізуючого випромінення. Оцінка базується на використанні накопичених експериментальних даних досліджень аналогічних джерел іонізуючого випромінення. Тому цей метод доцільно використовували лише для оцінки залишкового ресурсу вибірки аналогічних джерел іонізуючого випромінення за факторами радіаційної стійкості, природного старіння і зношування, яку проводять згідно з ДСТУ 3004-95. Отже, для одиничного екземпляру джерела іонізуючого випромінення використання цього методу не доцільне.

Метою даної роботи є розроблення методу продовження строку служби окремого джерела іонізуючого випромінення та визначення терміну, протягом якого це ДІВ може експлуатуватися після закінчення строку служби.

Отже, завданнями, які необхідно вирішити в роботі є:

1. Сформулювати вимоги до методу продовження строку служби закритих ДІВ за результатами калібрування.
2. Вдосконалити методику калібрування закритих ДІВ з метою її використання для продовження строку служби закритих ДІВ.
3. Розробити метод продовження строку служби закритих ДІВ на основі врахування результатів попередніх калібрувань.
4. Провести експериментальні дослідження щодо продовження строку служби закритих ДІВ.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ЗАКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ

Згідно з технічним регламентом закритих джерел іонізуючого випромінювання їх строк служби встановлюється виробником як термін можливого використання ДІВ з моменту його виготовлення. У разі закінчення строку служби використання такого джерела повинне бути зупинене [2]. Якщо радіаційні характеристики, герметичність та відсутність дефектів та їх ознак на ДІВ можуть бути підтвержені, то його строк служби може бути продовжений згідно з установленим законодавством порядком. Але наразі законодавство не регламентує умови подовження строку служби закритих ДІВ (ЗДІВ) та тривалість їх експлуатації.

Строк служби ЗДІВ встановлюється виробником з моменту його виготовлення з врахуванням відповідності призначенню та вимогам стандартів. Важливими є вимоги до герметичності закритих ЗДІВ герметичності його конструкції, що за умов належних умов експлуатації повинно забезпечувати радіаційну безпеку в місцях експлуатації та зберігання ЗДІВ [54].

2.1 Розроблення вимог до комплексного методу продовження строку служби ЗДІВ

Проведені дослідження показали той факт, що лише існуючі процедури калібрування не можуть бути застосовані для продовження строку служби ЗДІВ. Метод продовження строку служби закритих ДІВ повинен комплексно забезпечувати виконання наступних завдань[13]:

- збереження метрологічних характеристик ЗДІВ;
- збереження герметичності ЗДІВ;
- впевненість у відсутності дефектів та їх ознак ЗДІВ;
- забезпечення статистичної керованості зміни метрологічних характеристик ЗДІВ.

Для виконання таких завдань повинні виконуватися такі вимоги:

1. Внаслідок того, що калібрування є найбільш інформативною процедурою перевірки працездатності та метрологічних характеристик ЗДІВ, ми пропонуємо використовувати цю процедуру та результати попередніх ЗДІВ, як основу для створення методу продовження строку служби ЗДІВ.

2. Результати планових та позапланових калібрувань протяги строку служби можуть свідчити про стан функціонування[84]. Згідно цих даних можна діагностувати та прогнозувати технічний стан ЗДІВ. Статистичні дані результатів калібрувань фіксуються та зберігаються архівом калібрувальної лабораторії, а значить вони можуть використовуватися для аналізу змін метрологічних характеристик ЗДІВ. Важливим є метод опрацювання[80, 81] таких даних, які набувають статистичного характеру протягом всього строку служби ЗДІВ.

3. Важливою вимогою до нового методу є забезпечення статистичної керованості процесу зміни метрологічних характеристик ЗДІВ та способу опрацювання результатів калібрувань, які проводилися протягом строку служби закритих ДІВ. Тому пропонуємо використання контрольних карт для контролю процесу змін метрологічних характеристик ЗДІВ та прогнозування стану закритих ДІВ і визначення значення подовженого строку служби [55]. Але необхідно враховувати таку умову, за якої продовжений термін експлуатації може бути визначеним, а небезпека при функціонуванні ЗДІВ перевищуватиме економічний ефект використання ЗДІВ.

4. Процедури калібрування мають продовжуватися і після продовження строку служби. Проте для безпеки та уникнення ризиків мають бути встановлені нові міжкалібрувальні інтервали, але з меншим часовим інтервалом між послідовними процедурами калібрувань.

5. Валивою є вимога щодо можливості визначення максимального значення часу, на який продовжується строк служби ЗДІВ. Це може бути реалізованим шляхом вибору виду контрольних карт, що забезпечило би можливість прогнозування на базі опрацювання попередніх даних калібрувань.

6. Необхідним є вдосконалення методики калібрування та долучення процедури перевірки на герметичність ЗДІВ [25]. Ця процедура повинна бути розроблена на основі дослідження існуючих методів перевірки на герметичність, але з урахуванням конструктивних особливостей ЗДІВ.

Запропонована модель, яка описує математично вищерозглянуті вимоги, подана як система рівнянь [56]:

$$\begin{cases} U_{ki} \leq U_{\text{дон}} \\ T_{\text{max}} = f(E, R, U_{ki}) \\ \Delta T_{ki} \leq \Delta T_{\text{пр}} \\ f(G) = \text{const} \end{cases} \quad (2.1)$$

Де E - значення економічного ефекту;

R - значення ризику;

U_{ki} - сумарна невизначеність i -го калібрування під час продовженого строку служби ЗДІВ;

ΔT_{ki} - значення міжкалібрувального інтервал після продовження строку служби ЗДІВ;

$U_{\text{дон}}$ - допустиме значення невизначеності результатів калібрування ЗДІВ;

T_{max} - подовжений строк служби ЗДІВ;

$\Delta T_{\text{пр}}$ - значення міжкалібрувального інтервалу до продовження строку служби;

$f(G)$ - показник герметичності ЗДІВ.

Отже, доцільним є розроблення комплексного методу подовження строку експлуатації закритих джерел іонізуючого випромінення на основі:

- опрацювання результатів калібрування за строк служби закритого ДІВ;
- опрацювання результатів перевірки на герметичність закритого ДІВ

- дослідження статистичної керованості метрологічних характеристик закритих ДІВ з використанням контрольних карт кумулятивних сум.

2.2 Аналізування методики калібрування закритих ДІВ

Рішення про продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінювання може бути прийняте на основі інформації про результати попередніх калібрувань, які проводилися впродовж строку служби закритих ДІВ та опрацювання інформації про калібруваннях[87, 100].

Існуюча методика калібрування [51] передбачає лише метрологічну перевірку значення активності закритих ДІВ, але не передбачає перевірки на герметичність, що регламентовано міжнародними нормативними документами.

Тому актуальним є вдосконалення методики калібрування закритого ДІВ шляхом впровадження процедури перевірки герметичності закритого джерела іонізуючого випромінювання. При цьому необхідним є врахування додаткових складових невизначеності калібрування, які можуть виникати під час перевірки герметичності ЗДІВ [91].

Метою є розроблення засад методики калібрування закритих ДІВ на основі контролю активності та герметичності закритих ДІВ. Для реалізації цієї мети в розділі вирішені такі завдання:

- аналізування методу калібрування закритих ДІВ;
- аналізування складових невизначеності вимірювання активності радіонуклідів при калібрування закритих ДІВ;
- розроблення засад методики перевірки герметичності закритих ДІВ;
- аналізування складових непевності перевірки герметичності закритих ДІВ;
- формування загального бюджету невизначеності закритих ДІВ;
- оцінювання невизначеності результатів калібрування закритих ДІВ.

Калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) безпосередньо пов'язане із встановленням та контролем метрологічних характеристик ЗВТ[85]. З 2016

року було введено в дію останню редакцію Закону України „Про метрологію та метрологічну діяльність” відповідно до якого калібрування засобів вимірювальної техніки є сукупністю операцій, з використанням яких:

- на першому етапі за заданих умов встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов’язаними з ними невизначеностями вимірювань;

- на другому етапі ця інформація вже використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу [57].

Також цим законом було введено поняття метрологічної простежуваності (простежуваність), як властивості результату вимірювань. Вона полягає у тому, що результат вимірювань може бути пов’язаний з еталонном через задокументований нерозривний ланцюг калібрувань, кожне з яких робить свій внесок у невизначеність вимірювання [58]. ЗДІВ не належать до переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, які підлягають метрологічній повірці згідно Постанови кабінету міністрів України № 374 від 04.06.2015 року [59], а отже ЗДІВ підлягають процедурі калібрування.

Калібрування закритих ДІВ проводять шляхом визначення активності радіонуклідів закритих ДІВ з використанням еталонного закритого ДІВ та компаратора відносним методом в ідентичних геометричних умовах шляхом порівняння швидкості підрахунку імпульсів від каліброваного і еталонного джерел з багаторазовою зміною джерел. Схема калібрування закритого джерела іонізуючого випромінювання подана на рисунку 1. Використання методу багаторазового заміщення дає можливість виключити систематичну складову невизначеності вимірювання, обумовлену нестабільністю компаратора [51].

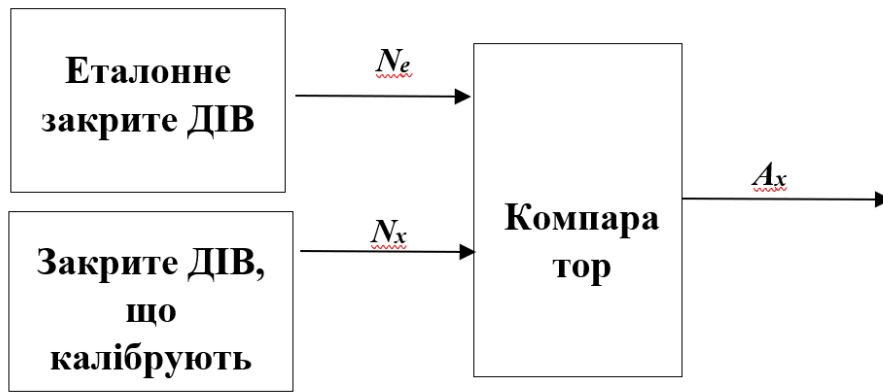


Рисунок 2.1 – Схема калібрування закритого джерела іонізуючого випромінювання

Методика калібрування передбачає такі етапи: зовнішній огляд, вимірювання активності методом звіряння з еталонним джерелом, визначення непевності за результатами вимірювання активності, визнання джерела придатним до застосування та видача свідоцтва про калібрування.

Під час проведення вимірювання швидкість рахування (термін використано згідно [60]) імпульсів повинна бути не більше $0,05/\tau$ (с), де τ - мертвий час компаратора, наведений в протоколі експериментальних досліджень компаратора. Якщо швидкість рахування імпульсів перевищує $0,05/\tau$, рекомендується ослабити випромінювання джерела за допомогою решіткових коліматорів, які необхідно встановити перед детектором компаратора.

Послідовно проводять вимірювання швидкості рахування імпульсів від еталонного джерела n_{ei} , від каліброваного джерела n_{ki} та фону n_{fi} . Вимірювання повторюють не менше m разів, де $5 \leq m \leq 10$. Число m вибирають, виходячи з необхідної точності вимірювань. Час одного вимірювання обирають від 100с до 1000с в залежності від рівня активності джерела. При цьому для закритих ДІВ, які мають вищу активність, час вимірювання має вище значення.

Під час визначення часу одного вимірювання і числа вимірювань необхідно дотримуватися вимоги: значення результатів спостережень не повинно перевищувати 1%. Для оцінювання використовується формула (2.2)

відносного результату вимірювання швидкості рахування імпульсів при наявності фону:

$$S = \frac{\sqrt{\frac{n_n}{t_n} + \frac{n_\phi}{t_\phi}}}{n_n - n_\phi} \quad (2.2)$$

де t_n , t_ϕ - повний час вимірювання швидкостей лічення імпульсів від джерела разом з фоном n_n , і від фону n_ϕ відповідно.

Оптимальне співвідношення часу вимірювання швидкостей рахування імпульсів від фону і джерела разом з фоном визначають за формулою (2.3). При великій швидкості рахування імпульсів від джерела час вимірювання при рахуванні імпульсів від фону може бути зменшений.

$$\frac{t_\phi}{t_n} = \sqrt{\frac{n_\phi}{n_n}} \quad (2.3)$$

Для кожної i -ї серії вимірювання обчислюють відношення R_i швидкості рахування імпульсів від джерела, яке калібрують, n_{xi} і еталонного джерела n_{ei} з поправками на фон $n_{\phi i}$ за формулою (2.4) і отримують ряд значень $R_1, R_2, R_3, \dots, R_m$:

$$R_i = \frac{(n_{xi} - n_{\phi i})}{(n_{ei} - n_{\phi i})} \quad (2.4)$$

Середнє арифметичне значення відношення швидкостей рахування імпульсів, розраховують за формулою (2.5):

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i \quad (2.5)$$

Активність радіонуклідів A_x відповідно за формулою (2.6) та (2.7) :

$$A_x = A_e \times K_\lambda \times \bar{R} \quad (2.6)$$

де A_e – номінальне значення активності радіонукліду еталонного джерела;

K_λ – коефіцієнт, що корегує радіоактивний розпад радіонуклідів за період t .

$$K_\lambda = \exp\left(-0,693t/T_{1/2}\right) \quad (2.7)$$

де t – час який пройшов від калібрування закритого еталонного джерела до калібрування закритого ДІВ;

$T_{1/2}$ - період напіврозпаду радіонукліду (визначається за довідковими даними).

Отже, існуюча методика калібрування дозволяє провести перевірку метрологічних характеристик закритого ДІВ, а для контролю цілісності його конструкції необхідна перевірка герметичності, як окрема процедура. Перевірка на герметичність необхідна, оскільки[93]:

1. Забезпечує безпеку персоналу , які працюють на підприємстві з закритими ДІВ, а також персоналу калібрувальної лабораторії.
2. Не допускає забруднення обладнання оточуючого середовища на підприємстві та у калібрувальній лабораторії.
3. Визначає можливість чи неможливість подальшого функціонування закритого ДІВ, зокрема продовження його калібрування.

2.3 Аналізування складових невизначеності вимірювання активності радіонуклідів при калібруванні закритих ДІВ

Рівняння вимірювання (2.8) для визначення активності радіонуклідів закритих ДІВ має вигляд:

$$A_x = A_e \times \bar{R} \times K_\tau \times K_K \times K_\lambda \quad (2.8)$$

де A_e – номінальне значення активності еталонного джерела;

\bar{R} – середнє арифметичне значення відношення швидкостей підрахунку імпульсів від каліброваного та еталонного джерел, виміряне компаратором;

K_τ – коригуючий коефіцієнт на мертвий час компаратора;

K_K – коригуючий коефіцієнт на систематичну похибку компаратора;

K_λ – коригуючий коефіцієнт на радіоактивний розпад радіонуклідів.

Розширену невизначеність U калібрування ДІВ (рівняння 2.9) розраховують множенням сумарної невизначеності вимірювання, u_c (2.10), пов'язаної з оцінкою вихідної величини, на коефіцієнт охоплення k :

$$U = k \times u_c \quad (2.9)$$

$$u_c = \sqrt{\sum_i^m u_{Ai}^2 + \sum_i^m u_{Bi}^2} \quad (2.10)$$

де u_{Ai} – стандартна невизначеність по типу А, %;

u_{Bi} – стандартна невизначеність по типу В, %.

Надійність стандартної невизначеності вимірювання, яка є пов'язаною із оцінкою вихідної величини, може бути оцінена шляхом використання ефективних ступенів свободи. Критерій надійності вважається повністю виконаним, коли вклад невизначеності типу А визначається для кількості повторних спостережень більше 10. У цьому випадку розподіл значень вимірюваної величини відповідає нормальному закону розподілу Гауса. При цьому стандартна невизначеність вимірювання, пов'язана з оцінкою вихідної величини є надійною, коефіцієнт охоплення стандартно приймається $k=2$. Отже приписана розширена невизначеність результатів калібрувань відповідає ймовірності покриття 95%. Ці умови, загалом, справедливі для калібрування закритих ДІВ.

В процесі калібрування закритих ДІВ здійснюється визначення співвідношення результатів вимірювання активності радіонуклідів джерела, що калібрують, та активності радіонуклідів еталонного джерела за допомогою компаратора.

Розглянемо окремі складові невизначеності при визначенні активності радіонуклідів в процесі калібрування закритих ДІВ[90].

Невизначеність, що пов'язана з розсіюванням показів від джерела, що калібрують, та еталонного джерела розраховується по типу А за формулою (2.11):

$$\frac{u_A(\bar{R})}{\bar{R}} = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_1^m (R_i - \bar{R})^2} \quad (2.11)$$

де R_i – результат окремого спостереження;

\bar{R} – середнє значення багаторазових спостережень.

Інші складові невизначеності визначаються по типу В.

Невизначеність, що вноситься еталоном визначається згідно рівняння 2.12:

$$\frac{u_B(A)}{A} = \frac{U_{em}}{2} \quad (2.12)$$

де U_{em} – розширена невизначеність еталонного значення із свідчення про калібрування.

Невизначеність коригуючого коефіцієнта на розпад джерела визначається згідно рівняння 2.13:

де Δ_λ – похибка, обумовлена довідковими даними значення періоду напіврозпаду радіонуклідів. Відповідно до сталої практики похибка, що вноситься використанням довідкових даних, становить 2 %.

$$\frac{u_B(K_\lambda)}{K_\lambda} = \frac{\Delta_\lambda}{2\sqrt{3}} \quad (2.13)$$

Невизначеність коригуючого коефіцієнта на мертвий час компаратора визначається згідно рівняння 2.14:

$$\frac{u_B (K_\tau)}{K_\tau} = \frac{\Delta_\tau}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

де Δ_τ - похибка визначення мертвого часу компаратора, %

$$K_\tau = \frac{(1 - n_{xi})}{(1 - n_{ei})} \quad (2.15)$$

де n_{xi} – швидкість рахування імпульсів від ДІВ, що калібрують, виміряне за допомогою компаратора;

n_{ei} – швидкість рахування імпульсів від еталонного джерела, виміряна за допомогою компаратора.

Невизначеність коригуючого коефіцієнта на систематичну похибку компаратора визначається згідно рівняння 2.16:

$$\frac{u_B (K_K)}{K_K} = \frac{\Delta_K}{\sqrt{3}} \quad (2.16)$$

де Δ_K - систематична похибка компаратора, %.

$$K_K = 1,0 \quad (2.17)$$

Невизначеність коригуючого коефіцієнту до зміни температури від стандартних умов визначається згідно рівняння 2.18:

$$\frac{u_B(K_T)}{K_T} = \frac{\Delta_T}{\sqrt{6} \times T \times K_T} \times 100 \quad (2.18)$$

де Δ_T - зміна температури під час проведення калібрування.

$$K_T = \frac{T_0}{T} \quad (2.19)$$

де T_0 – стандартна температура повітря, 293,15К;

T – температура під час калібрування.

При калібруванні закритого ДІВ в нормальних умовах від 15 °С до 25 °С корегування по температурі не виконується. Відповідно до експлуатаційної документації на компаратор в цьому діапазоні температури відсутня додаткова похибка компаратора, викликана зміною температури від стандартної. При зміні температури більше як на 10°С від стандартної температури 293,15 К, необхідно враховувати корегування по температурі при калібруванні закритого ДІВ. Корируючі коефіцієнти до зміни тиску за цим методом не застосовуються, так як вплив підвищеного тиску має значення тільки для герметичних виробів, а вплив пониженого тиску в нашій місцевості малоймовірний.

Сумарна відносна стандартна невизначеність відповідно до рівняння розраховується згідно виразу[89] (2.20):

$$\frac{u_c(A_x)}{A_x} = \sqrt{\frac{u_A(\bar{R})^2}{\bar{R}} + \frac{u_B(A_e)^2}{A_e} + \frac{u_B(K_\lambda)^2}{K_\lambda} + \frac{u_B(K_\tau)^2}{K_\tau} + \frac{u_B(K_K)^2}{K_K} + \frac{u_B(K_T)^2}{K_T}} \quad (2.20)$$

Оскільки існуюча методика калібрування не містить процесу перевірки на герметичність, то і описана методика не враховує невизначеності від визначення герметичності ДІВ. Тому доцільно розглянути методику випробування закритих ДІВ на герметичність та провести аналіз складових невизначеності.

2.4 Розроблення методики випробування закритих ДІВ на герметичність

Для проведення калібрування закритих джерел іонізуючого випромінювання необхідно провести випробування закритих ДІВ на герметичність. В процесі калібрування закритих ДІВ на герметичність мають бути виконані такі операції:

1. Зовнішній огляд.
2. Перевірка поверхневого забруднення та герметичності закритого ДІВ.
3. Встановлення відповідності умов використання закритого ДІВ класам міцності зовнішніх факторів впливу, заданих [61].

Розглянемо докладніше ці операції.

Зовнішній огляд проводиться візуально або з допомогою оптичних засобів.

При зовнішньому огляді повинно бути встановлено:

- наявність паспорта на закриті ДІВ (або їх комплект)
- відповідність номера і маркування закритого ДІВ даним паспорта;
- відсутність механічних пошкоджень, деформацій,

Вимірювання поверхневого забруднення пропонується проводитися такими методами, в залежності від конструкції закритого ДІВ:

- прямим методом (дозиметром, радіометром);
- непрямим методом (методом мазка).

Пряме вимірювання застосовується при вхідному контролі з метою запобігання перевищенню контрольних рівнів забруднення транспортних засобів, пакувальних ящиків, захисних контейнерів, пеналів з закритих ДІВ та виключення випадків розповсюдження радіоактивного забруднення [14, 62].

Метод мазка застосовується для перевірки нефіксованого забруднення кожного екземпляру ЗДІВ, який використовується для контролю технічного стану. Цей метод застосовується для вимірювання рівнів забруднення поверхонь ЗДІВ із визначення активності поверхні контрольованого ЗДІВ контактним шляхом на сорбент. В якості сорбенту використовують тампони з марлі (вати)

або фільтрувального паперу. Матеріал для мазка повинен відповідати контрольованій поверхні (папір для гладких поверхонь, бавовняна тканина для шорстких поверхонь). Мазок може бути сухий (папір) і вологий. Для зволоження використовують: дистильовану воду, етиловий спирт, азотну кислоту розведену до 7-10%. Засіб зволоження не повинен вивітрюватись з матеріалу.

Використання зволожувального засобу може призвести до суттєвої недооцінки забруднення у випадку альфа- випромінювачів, для контролю нефіксованого радіоактивного забруднення матеріал для мазка притискають до контрольованої поверхні із середнім зусиллям ($0,2-0,5 \text{ кгс/см}^2$) кінчиками пальців, або краще, за допомогою тримача, сконструйованого так, щоб гарантувати однорідний і постійний тиск, і протирають два, три рази.

Забруднена площа мазка повинна бути менша або дорівнювати чутливій площі детектора пристрою, за допомогою якого вимірюється активність мазка. Відхилення товщини сорбенту від товщини джерела, яким калібрували радіометр приймають рівним $\pm 0,5 \text{ мм}$ [63, 64]. Відстань від мазка до детектора, у випадку α – або β – випромінювання, повинна бути мінімальною, але мазок не повинен контактувати з поверхнею детектора. Після зняття мазка тампон складають брудною стороною всередину і кладуть у пронумерований поліетиленовий пакет. Після відбирання мазків, матеріал мазка потрібно висушити без втрати активності.

При вимірюванні підготовлених мазків з допомогою радіометричних установок враховується чинник зняття радіоактивності K_M . Для сухого мазка приймають $K_M = 0,2$, для вологого $K_M = 0,6$. Для важливих комбінацій забруднення матеріалу чинник зняття можна вичерпного знімання визначити експериментально, використовуючи метод повторюваними мазками. Якщо K_M не визначено експериментально, то [64, 65] рекомендує брати консервативне значення $K_M = 0,1$.

2.5 Аналізування складових непевності перевірки герметичності закритих ДІВ

Рівняння вимірювання активності мазка має вид (2.21):

$$A_m = \frac{n_M - n_\phi}{\varepsilon_{уст} \times K_M \times \varepsilon_M} \quad (2.21)$$

де A_m - активність мазка;

n_M - швидкість рахування для мазка;

n_ϕ - швидкість рахування для фону;

$\varepsilon_{уст}$ - ефективність установки по зовнішньому виходу в кут 2π еталонного джерела;

K_M - чинник зняття мазка;

ε_M - чинник, що враховує втрати на поглинання в матеріалі мазка.

$$\varepsilon_{уст} = \frac{n_{ет} - n_\phi}{N_{2\pi}} \quad (2.22)$$

де $n_{ет}$ - швидкість рахування від еталонного джерела;

$N_{2\pi}$ - зовнішній вихід в кут 2π еталонного джерела.

Відповідно до [25, 66] чинник, що враховує втрати на поглинання матеріалу мазка складає $\varepsilon_M = 0,25$ для альфа-випромінювання; $\varepsilon_M = 0,25$ для бета-випромінювання з енергією бета-частинок $0,15\text{MeV} < E_{\beta\text{max}} < 0,4\text{MeV}$ та $\varepsilon_M = 0,5$ для бета-випромінювання з енергією бета-частинок $E_{\beta\text{max}} \geq 0,4\text{MeV}$.

Невизначеність типу А вимірювання активності мазка:

$$\frac{u_A(\bar{R})}{\bar{R}} = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_1^m (R_i - \bar{R})^2} \quad (2.23)$$

де R_i – результат окремого спостереження;

\bar{R} – середнє значення багаторазових спостережень.

Невизначеності типу В відповідає невизначеності радіометра, її значення береться із свідчення про калібрування радіометра.

Розширену невизначеність мазка U_M , розраховують множенням сумарної невизначеності вимірювання u_c , пов'язаної з оцінкою вихідної величини, на коефіцієнт охоплення k :

$$U_M = k \times u_c \quad (2.24)$$

$$u_c = \sqrt{\sum_i^m r_{Ai}^2 + \sum_i^m r_{Bi}^2} \quad (2.25)$$

де r_{Ai} – стандартна невизначеність по типу А, %;

r_{Bi} – стандартна невизначеність по типу В, %.

Герметичність закритих гамма-джерел перевіряється імерсійним методом (його ще називають методом “кислотної витяжки”), який наведено в [56]. Даний метод базується на вимірюванні активності радіонуклідів, що перейшли в рідину після занурення в неї джерела на зазначений термін. В якості рідини використовується розчин 7-10% азотної кислоти, в яку занурюється не більше 10 джерел. Розчин з джерелами нагрівають до $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ і витримують 4 год. (або до $T = \pm 60^\circ\text{C}$ на (1,0-1,5) годин), допускається кип'ятіння протягом 10 хвилин. Радіонуклідний склад рідини визначається на гамма спектрометрах з напівпровідниковими блоками детектування або на гамма-спектрометрах зі сцинтиляційними детекторами.

2.6 Формування розширеної непевності калібрування закритих ДІВ з врахуванням перевірки на герметичність

Оскільки калібрування закритих ДІВ проходить у два етапи, то рівняння вимірювання для двох етапів калібрування складатиметься з системи рівнянь, а саме рівняння визначення активності радіонуклідів закритих ДІВ A_m та визначення активності мазка A_x :

$$\begin{cases} A_M = W \frac{n_M - n_\phi}{\varepsilon_{ycm} \times K_M \times \varepsilon_M} \\ A_x = W \times A_e \times \bar{R} \times K_\tau \times K_K \times K_\lambda \end{cases} \quad (2.26)$$

де W – коефіцієнт, який визначає позитивний ($W=1$) або негативний результат перевірки на герметичність ($W=0$).

При цьому непевність теж описується як система рівнянь:

$$\begin{cases} u_c = \sqrt{\sum_i^m u_{Ai}^2 + \sum_i^m u_{Bi}^2} \\ \frac{u_c(A_x)}{A_x} = \sqrt{\frac{u_A(\bar{R})^2}{\bar{R}} + \frac{u_B(A_e)^2}{A_e} + \frac{u_B(K_\lambda)^2}{K_\lambda} + \frac{u_B(K_\tau)^2}{K_\tau} + \frac{u_B(K_K)^2}{K_K} + \frac{u_B(K_T)^2}{K_T}} \end{cases} \quad (2.27)$$

Рівняння розширеної невизначеності враховує всі чинники, які впливають на точність результатів вимірювання при калібруванні та перевірці герметичності закритого ДІВ.

Висновки до розділу 2

Сформовано загальні вимоги для розроблення методу продовження строку служби закритих ДІВ на основі аналізу результатів попередніх калібрувань ДІВ.

На основі аналізу існуючої методики калібрування закритих ДІВ показано, що вона включає лише процедуру перевірки метрологічних характеристик

закритих ДІВ. Запропонована методика калібрування закритих ДІВ, який включає методику перевірки на герметичність закритих ДІВ, відповідає міжнародним вимогам нормативних документів щодо закритих ДІВ.

Вдосконалене рівняння вимірювання дає змогу врахувати всі чинники, які впливають на закриті ДІВ при калібруванні.

Результати калібрування вдосконаленої методики калібрування, яка включає перевірку на герметичність, можна використовувати як базову інформацію при прийнятті рішення для продовження строку служби закритих ДІВ.

Запропоновано основні засади методики перевірки на герметичність на основі методів мазка та кислотної витяжки. Сформовано рівняння вимірювань та вираз для розрахунку невизначеності.

Для обчислення сумарної невизначеності обох еталонів калібрування запропонована система рівнянь, яка враховує всі чинники, які впливають на точність результатів вимірювання при калібруванні та перевірці герметичності закритого ДІВ.

Розділ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ ЗАКРИТИХ ДІВ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ КАЛІБРУВАННЯ

3.1 Загальні відомості, щодо контрольних карт Шухарта

Для перевірки контролю стану і стабільності процесу зміни метрологічних характеристик закритого ДІВ доцільно використати контрольні карти Шухарта. Аналіз інформації за допомогою контрольних карт надає можливість подальшого моделювання процесу з метою прийняття рішень [98].

Розглянемо типи контрольних карт Шухарта [97].

Контрольні карти є основним інструментом статистичного управління процесами (SPC). Вони забезпечують простий графічний метод, що дає змогу[67]:

- визначити, чи є процес стабільним, тобто таким, що функціонує під впливом системи випадкових причин, які не змінюються в часі, що характеризують власну мінливість процесу (процес є статистично керованим);
- порівняти дані, отримані з вибірок, що представляють поточний стан процесу, з межами, що відображають його мінливість, з метою оцінювання стабільності та мінливості процесу;
- ідентифікувати, досліджувати та за можливості зменшити/усунути вплив спеціальних причин мінливості, що можуть привести процес до неприпустимого рівня функціонування;
- використовувати для управління процесом дані про його мінливість (наявність тренду серії, циклів тощо);
- визначити, чи поводить він передбачуваним і стабільним чином і чи можлива оцінка відповідності процесу встановленим вимогам;
- визначити, чи відповідають вимогам продукція, послуга, відтворюваність процесу для вимірюваної характеристики;
- забезпечити регулювання процесу на основі прогнозу його поведінки, використовуючи статистичні моделі;

- оцінювати результативність системи вимірювань.

Контрольна карта є графічним способом подання даних про процес[68]. Через певні інтервали часу відбирають підгрупи одиниць продукції встановленого обсягу, для яких визначають значення характеристики або наявність ознаки зміни. Отримані дані подають у вигляді відповідного статистичного графіку на контрольній карті. Контрольна карта складається з центральної лінії що слугує для відображення рівня навколо котрого в середньому змінюється контрольована величина. Також на контрольній карті зображують дві лінії що називаються контрольні межі. Вони розташовані по різні сторони від центральної лінії і визначають ділянку, у межах якої статистична величина в середньому змінюється випадково, якщо процес перебуває у статистично керованому стані. Дві контрольні межі використовують для прийняття рішення про стан процесу. Якщо отриманий графік перебуває між контрольними межами, то робиться висновок про стан статистичної керованості процесу, а отже він може продовжуватися без змін[69].

Однак значення точок статистичного графіка поза межами контрольних меж сигналізує, що процес є неконтрольованим. Контрольна карта в цьому випадку вказує на присутність спеціальної причини мінливості на необхідність впливу на процес з метою повернення у керований стан.

Нами було проведено порівняння різних видів контрольних карт з метою вибору для застосування для контролю стану і стабільності процесу зміни метрологічних характеристик закритого ДІВ. Результати подано в таблиці в Додатку.

За допомогою контрольних карт можна проводити аналіз процесів, зокрема:

- проведення досліджень для визначення джерел спеціальної причини мінливості з метою усунення, скорочення або в майбутньому відновлення впливу цієї причини;
- продовження роботи процесу з врахуванням ризику;
- регулювання процесу;
- зупинення процесу та проведення коригування;

- у випадках, коли спеціальні причини дають позитивні наслідки (наприклад, під час удосконалення процесу), збереження дії спеціальної причини, щоб за можливості вона стала постійною.

Іноді на контрольну карту наносять додаткові попереджувальні межі. Якщо точка результатів спостережень перебуває поза попереджувальними межами, але між контрольними межами, то жодних впливів на процес не потрібно, але необхідно звернути увагу на виявлення присутності спеціальної причини мінливості процесу.

У цьому разі є доцільним скорочення інтервалу часу між відбором вибірок, або збільшення обсягу вибірок для визначення наявності змін процесу. Якщо на контрольну карту нанесено попереджувальні межі, контрольні межі іноді називають "межами дії".

Для ухвалення рішення про стан процесу використовують також додаткові правила, що ґрунтуються на аналізі розташування даних усередині контрольних меж.

Контрольні карти часто використовують для оцінки стабільності процесу. Процес є статистично керованим, якщо він перебуває під впливом тільки випадкових причин, тобто на нього не впливають екстраординарні, несподівані, спеціальні причини. Такі спеціальні причини можуть впливати як на рівень процесу, так і на його мінливість або на те й інше одночасно.

Здебільшого, якщо процес перебуває у стані статистичної керованості, можна досить достовірно передбачити його поведінку, тоді як за наявності спеціальних причин поведінка процесу не може бути прогнозована без інформації про наявність і вплив цих причин. Процес, який не є у стані статистичної керованості, вважається неконтрольованим та потребує приведення його у статистично керований стан шляхом докладання додаткових зусиль. Для деяких економічних або природних явищ можуть бути відсутні способи впливу на процес, і контрольна карта в цьому випадку слугує для ідентифікації відсутності контролю[70].

3.2 Вибір карт кумулятивних сум та їх застосування.

Розглянувши типи контрольних карт (КК) можемо прийти до висновку, що для забезпечення контролю процесу зміни метрологічних характеристик закритого ДІВ найбільше підходять карти кумулятивних сум[71], з ряду причин.

КК накопичувальних сум, які називаються CUSUM-карти, використовуються в методах контролю якості процесів з метою виявлення перевищення абсолютних критичних значень показників процесів. CUSUM-карти можуть забезпечити на ранній стадії виявлення виходу процесу з-під контролю, отже дають уявлення про поведінку процесу краще, ніж карти Шухарта. За допомогою карт Шухарта не завжди вдається визначити момент виникнення істотних змін процесу[96]. CUSUM-карти дають змогу точно та швидко визначити області змін процесу та моменти необхідності проведення коригувальних дій[72].

Відмінною особливістю CUSUM-карт є таке: рішення щодо налагодженості процесу приймається з урахуванням попередньої інформації про процес. Така схема забезпечує значне зменшення середньої довжини серії вибірок та показує що розладнаність процесу виявляється значно швидше, ніж при використанні вибірових статистик, як незалежних результатів контролю. Особливість використання CUSUM-карт полягає у тому що нанесені на КК представляють собою інформацію про спостереження від першого до останнього включно.

Тому інформацію перевірки активності та герметичності ЗДІВ з часу випуску джерела з виробництва доцільно аналізувати за використанням CUSUM-карт [15].

Вибір масштабу дуже важливий, так як невдалий масштаб може створити помилкове враження про стан процесу. Масштаб, вибраний у відповідності з вище згаданими перерахуваннями показує, що обґрунтовані зміни не є ні дуже чутливим, ні дуже інертними.

Проведення графічної оцінки CUSUM-карт будемо проводити за допомогою обтятої V-маски. Обробка CUSUM-карт з використанням обтятої V-

маски використовується шаблон з розрізом у вигляді обтятої літери “V”, який утворює границі області відхилення.

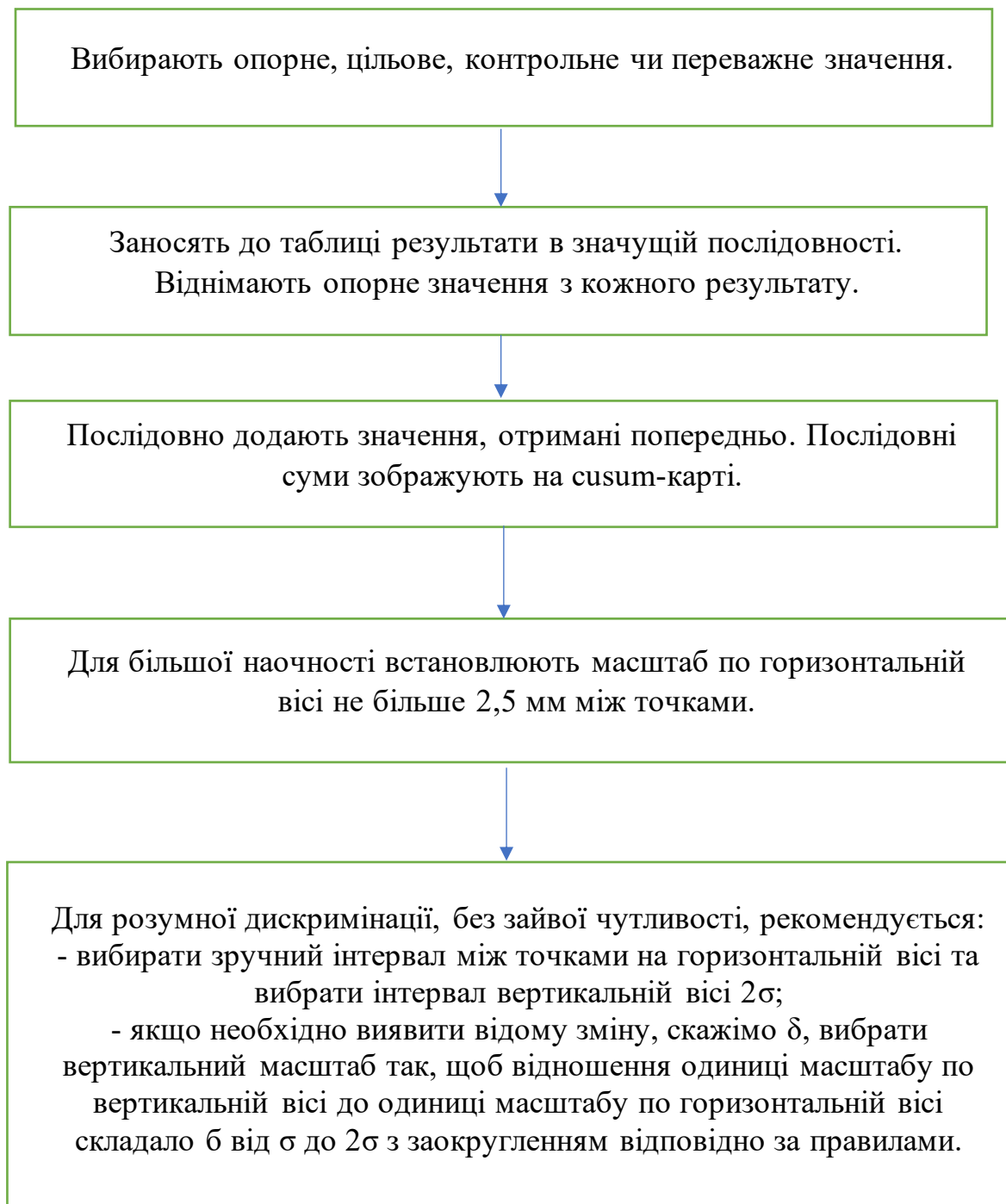


Рисунок 3.1 - Алгоритм побудови cusum-карт

Алгоритм дій для подовження строку служби джерела іонізуючого випромінення на основі результатів калібрування.

Пропонуємо застосувати наступний алгоритм[15]:

1. Проведення планових калібрувань ДІВ протягом строку служби.
2. Формування бази даних результатів калібрувань ДІВ за весь строк служби.
3. Побудова *cusum*-карти за результатами калібрувань ДІВ за весь строк служби з урахуванням дійсного значення активності ДІВ.
4. Побудова усіченої *V* маски з урахуванням часових інтервалів досліджень.
5. Перевірка на статистичну керованість шляхом накладання усіченої *V* маски на графік *cusum*-карти.
6. Прогнозування активності радіонуклідів ДІВ на заданий період часу з використанням регресійного аналізу.
7. Перевірка прогнозованих значень на статистичну керованість з метою прийняття рішення щодо продовження строку служби джерела на визначений період.

Методика побудови *cusum*-карти для подовження строку служби джерела іонізуючого випромінення на основі результатів калібрування.

Інформацію щодо періодичних калібрувань активності радіонуклідів за весь строк служби ДІВ аналізуємо за допомогою карт кумулятивних сум[71]. Відхилення ΔX_i отриманого результату вимірювання X_i від опорного значення T становить:

$$\Delta X_i = X_i - T \quad (3.1)$$

Під опорним значенням ми розуміємо активність радіонукліду за паспортом. Значення кумулятивної суми відхилень фактичних значень від цільового ΔX_Σ розраховується за формулою[73]:

$$\Delta X_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (3.2)$$

Проведення графічної оцінки *cusum*-карт проводимо за допомогою обтятої V-маски. Обробка *cusum*-карт з використанням обтятої V-маски використовується шаблон з розрізом у вигляді обтятої літери “V”, який утворює границі області відхилення.

Обтята V-маска загального призначення показана на рисунку 3.2. Вона містить точку початку відліку O, а вертикальні відрізки OB і OC довжиною $5\sigma_e$ розташовані по обидва боки від лінії початку відліку (тобто $h = 5\sigma_e$). Ці два відрізки називають інтервалами рішень. Два похилі відрізки BA і CD, які називаються дозвільні лінії, охоплюють *cusum*-графік. Розмір EO дорівнює десяти інтервалам спостережень, а вертикальні відрізки EA і ED дорівнюють $10\sigma_e$ (тобто $F = 0,5\sigma_e$).

$$\begin{aligned} h &= h_{OB} = h_{OC} = 5\sigma_e ; \\ 2h &= h_{EA} = h_{ED} = 10\sigma_e; \\ l_{OE} &= 10d; \end{aligned} \tag{3.3}$$

де d – інтервал спостереження, σ - стандартне відхилення процесу; σ_e - стандартна помилка. За значеннями цих інтервалів будуємо дозвільні лінії l_{CD} і l_{BA} .

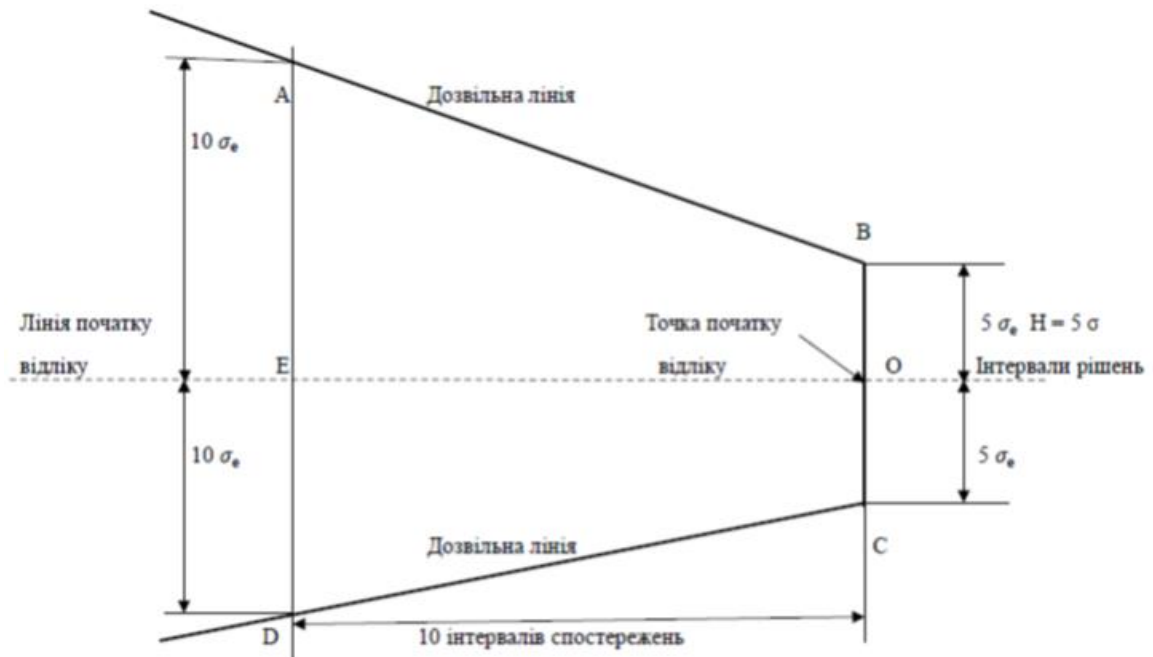


Рисунок 3.2 - Параметри обтятої V-маски.

Для використання маски на лінії початку відліку, розташованій горизонтально на *cusum*-карті, вказують точку початку відліку. У ситуації, коли управління процесом триває, це найостанніша точка. Якщо *cusum*-графік розташований усередині дозвільних ліній маски (або їхнього подовження до точки A і D), то істотного зсуву в середньому на цьому графіку не виявлено. У цьому разі процес перебуває у стані статистичної керованості щодо опорного значення. Якщо графік зміни *cusum* виходить за роздільні лінії маски, це вказує на істотне відхилення від цільового значення. У цьому разі процес є некерованим.

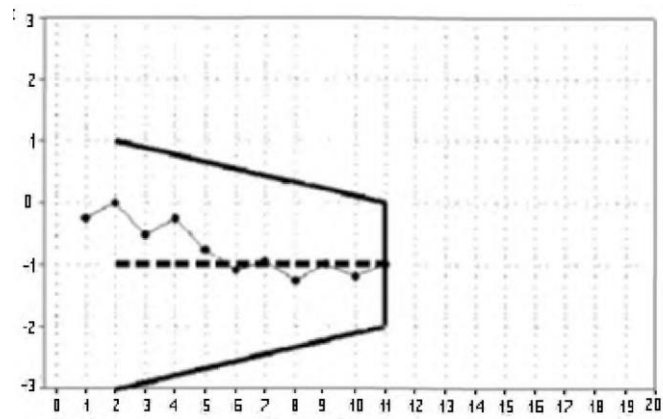


Рисунок 3.3 -Приклад використання обтягої V-маски.

За наявності тільки верхньої або тільки нижньої меж допустимих значень застосовують односторонній контроль. У цьому разі може бути використана напівмаска. При контролі зсуву вгору/вниз необхідна лише відповідна половина маски.

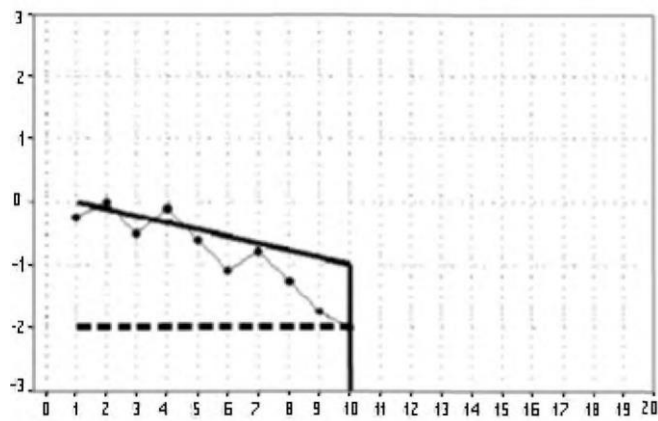


Рисунок 3.4 – Приклад використання обтягої напівмаски.

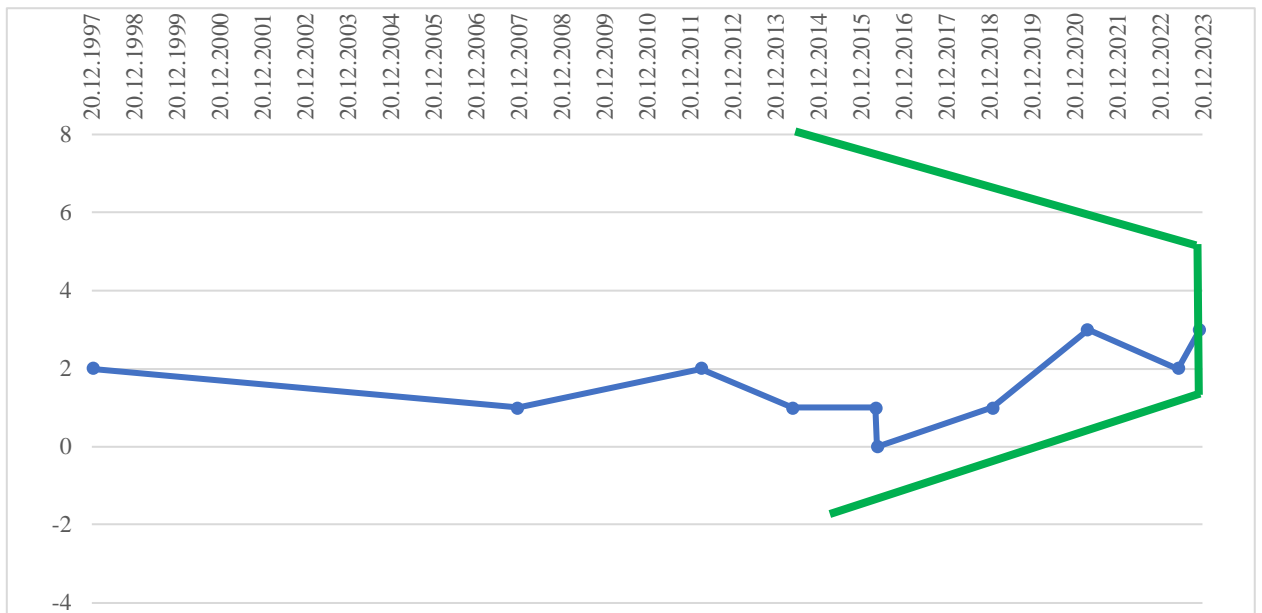


Рисунок 3.5 – Побудова контрольної карти кумулятивних сум за даними опрацювання результатів калібрування закритого ДІВ ВЕТУ-12-02-01-98

Використання cusum-карт є виправданим, коли компоненти процесу використовуються протягом тривалого часу або коли можна очікувати зміни середнього значення даних або вимірювань[74].

Після перевірки стану і стабільності результатів проведення перевірки активності та перевірки герметичності ДІВ, переходимо до другого етапу вибору методу екстраполяції, для моделювання ситуації з метою прийняття рішень.

3.3 Методи екстраполяції

Розглянемо коротко такі методи екстраполяції:

1. Згладжування за експонентою: полягає згладжування часового ряду за допомогою згладженої середньої плавної лінії, параметри якої відповідають експоненційному закону розподілу.

2. Метод гармонійних ваг: спостереження часового ряду зважуються таким чином, що пізнішим спостереженням надаються більші вагомості. Перевага методу - при застосуванні не треба робити ніяких припущень стосовно виду лінії тренду.

3. Метод дисперсійного аналізу: застосовують коли показник показник, який досліджується, знаходиться під впливом водночас кількох факторів. Оскільки врахувати всі впливні фактори вкрай важко, то необхідно виокремити ті з них, чий вплив є найбільш суттєвим.

4. Регресійний аналіз: визначення математичних формул, які показують статистичний зв'язок одного показника з іншим або з групою показників. Цей метод ґрунтується на статистичному моделюванні процесу.

5. Екстраполяція тренду: суть полягає у визначенні основної тенденції зміни на основі динамічного ряду статистичних даних (тренду). Вважається, що така тенденція поширюється на майбутнє в межах періоду прогнозування. При цьому дотримуються емпіричного правила - період прогнозування не має перевищувати одної третьої частини довжини бази прогнозу. Наприклад, для прогнозу на два роки бажано мати статистичні дані не менш як за шести років.

3.4 Вибір методу екстраполяції та його застосування.

Після перевірки стану і стабільності результатів проведення перевірки активності та перевірки герметичності ДІВ, переходимо до вибору методу екстраполяції. Серед існуючих методів екстраполяції: метод згладжування за експонентою, метод гармонійних ваг, метод дисперсійного аналізу, метод екстраполяції тренду, регресійний аналіз - доцільним є використання останнього. Так як активність джерела підлягає закону напіврозпаду, калібрування та перевірка на герметичність джерела мають відбуватися за нормальних умов, то фактори впливу приймаємо як незмінні. Розглянувши умови для застосування кожного з методів екстраполяції, дійдемо висновку, що найбільш зручним методом є регресійний аналіз. Цей метод ґрунтується на статистичному моделюванні [75].

Умови застосування методів екстраполяції : часовий ряд має статистично значущу тенденцію; процес, що досліджується є інерційним; закономірності процесу, які були у минулому, зберігатимуться й у майбутньому; фактори, які визначають розвиток процесу, залишаються незмінними. Екстраполяція по

середньому рівню ряду динаміки застосовується за відсутності статистично значущої тенденції розвитку (тренду). В цьому випадку рівні ряду коливаються навколо середнього значення, а прогнозовані значення розраховуються як середнє арифметичне значення всіх рівнів ряду. За умови що динамічний ряд прогнозованого показника має стійку тенденцію до зростання або спадання та коливання навколо цієї тенденції є незначними, в цьому випадку його екстраполяцію здійснюють за середнім темпом зміни рівнів ряду:

$$Y_{t+1} = Y_t \times \bar{T} \quad (3.4)$$

де, Y_{t+1} – прогнозний рівень ряду;

Y_t – останній рівень досліджуваного ряду;

\bar{T} – середній темп зміни рівнів ряду:

$$\bar{T} = \sqrt[n-1]{Y_t/Y_n} \quad (3.5)$$

де n – кількість рівнів ряду;

Y_n – початковий рівень досліджуваного ряду.

Складніші методи екстраполяції ґрунтуються на методі найменших квадратів. В цьому випадку графік динамічного ряду повинен показувати чітку тенденцію зростання або спадання досліджуваного показника. Наприклад, нехай існує тенденція ряду, яку можна описати лінійною функцією $Y=a+bT$. На основі використання методу найменших квадратів, можна визначити значення постійних a та b , а в подальшому застосувати це рівняння для прогнозування досліджуваного процесу. Для розрахунку постійних a та b використовуємо формули:

$$b = \frac{\sum TY - n \bar{T}\bar{Y}}{\sum T^2 - n (\bar{T})^2} \quad (3.6)$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{T} \quad (3.7)$$

де \bar{Y} – середньоарифметичне значення досліджуваного показника.

Метод найменших квадратів (МНК) [76] використовують також для апроксимації експериментальних даних функціональною залежністю шляхом параметричної оцінки функції регресії, яка описує залежність величини X від величини Y , значення якої (y_i) спостерігають з випадковими похибками (θ_i). Вибіркова регресійна модель може мати вид:

$$\hat{y} = ax^b \quad (3.8)$$

де y — вектор спостережень за залежною змінною;

x — вектор спостережень за незалежною змінною;

a, b — невідомі параметри регресійної моделі.

Формули для визначення параметрів a та b можемо записати, як регресію y від x , у якій параметри обчислені за методом найменших квадратів:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} \sum \ln y_i - \frac{b}{n} \sum \ln x_i\right) \quad (3.9)$$

$$b = \frac{n \sum (\ln x_i \ln y_i) - \sum \ln x_i \sum \ln y_i}{n \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln x_i)^2} \quad (3.10)$$

Після визначення параметрів регресійної моделі a та b , оцінюється щільність зв'язку між величинами y та x . це дає відповідь на питання наскільки значним є вплив змінної x на y . Критерієм, що надає кількісну оцінку впливу є коефіцієнт кореляції:

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2) (n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2)}} \quad (3.11)$$

Також використовується ще один критерій для визначення щільності зв'язку між двома або більше показниками, а також перевіряється адекватність побудованої регресійної моделі - дається відповідь на питання, чи зміна значення у лінійно залежить від зміни значення x , а не проводиться під впливом якихось випадкових факторів. Для цього служить коефіцієнт детермінації, який позначається R^2 . Він використовується в якості критерію адекватності моделі та розраховується за формулою:

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad (3.12)$$

Для адекватних моделей потрібно оцінювати їх точність, що характеризується відхиленням фактичних даних від розрахункових [77, 95]. У випадку подовження строку служби ДІВ, всі значення активностей отримані за весь життєвий цикл джерела, апроксимують регресійною функцією. Остання, у якій виявиться кращий коефіцієнт детермінації, обирається для прогнозування терміну подовження експлуатації ДІВ. Далі прогнозовану частину перевіряють за допомогою карт кумулятивних сум на статистичну керованість.

Рішення про час, на який можна продовжити строк служби закритого ДІВ приймається на основі емпіричного правила, згідно з яким період прогнозування не повинен перевищувати третьої частини довжини бази прогнозу і перевіривши прогнозовану частину за допомогою карт кумулятивних сум, та переконавшись, що процес перебуватиме в статистично керованому стані.

Висновки до розділу 3

Для досягнення цілі подовження терміну експлуатації при описі процесу доведено оптимальність використання Cusum-карт, які дають змогу швидко і

точно визначити область змін процесу і момент впровадження коригувальних дій.

Дотримуючись емпіричного правила, згідно з яким період прогнозування не має перевищувати однієї третьої частини довжини бази прогнозу і перевіривши прогнозовану частину за допомогою карт кумулятивних сум, та переконавшись, що процес перебуватиме в статистично керованому стані, показано, що маємо право продовжити термін експлуатації джерела іонізуючого випромінення на два роки.

Розділ 4

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО МЕТОДУ ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ ЗАКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ

4.1 Оцінювання невизначеності результатів калібрування на прикладі закритого джерела β -випромінення 1CO-21

В калібрувальну лабораторію надійшло бета – джерело типу 1CO-21 на калібрування. Для проведення калібрування будемо використовувати еталонне бета – джерело типу 1CO-531, активністю 28 Бк, з розширеною невизначеністю 2% (із свідцтва про калібрування еталонного джерела станом на 28 грудня 2018 року). За даними із документів наданими замовником разом з джерелом калібрування проводилося 15 червня 2021 року. Перед проведенням калібрування фіксуємо умови навколишнього середовища: температура 21 °С, вологість 63 %, атмосферний тиск 100,2 кПа, радіаційний фон 0,18 мкЗв/год. Для визначення складових невизначеності, що вносить компаратор записуємо значення стандартної невизначеності компаратора, що становить 0,69 %, із сертифіката про калібрування компаратора (компаратор бета – спектрометр СЕБ-01 “ВИДИ”), а також похибку мертвого часу компаратора 0,5 %, із експлуатаційної документації на спектрометр.

Далі переходимо до визначення активності та невизначеності джерела, що надійшло на калібрування. Для цього було послідовно виміряно швидкості рахування імпульсів від еталонного джерела та від джерела, що калібрується. Вимірювання повторювались 10 разів для кожного джерела. Були отримані результати, подані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Вимірювання швидкості рахування імпульсів від еталонного джерела та від джерела, що калібрується

Тип джерела	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Середнє значення
1CO-21	3,12	3,20	3,06	3,27	3,14	3,15	3,28	3,25	3,10	3,02	3,16
1CO-531	5,59	5,59	5,56	5,27	5,66	5,55	5,40	5,32	5,47	5,52	5,49

Для кожної серії вимірювань було обчислено відношення R_i , швидкості лічення джерела, що калібрують та швидкості лічення еталонного джерела, були отримані наступні результати, подані в таблиці 2.

Таблиця 4.2 - Обчислення відношення R_i , швидкості лічення джерела, що калібрують та швидкості лічення еталонного джерела

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Середнє значення
0,56	0,57	0,55	0,62	0,56	0,57	0,61	0,61	0,57	0,55	0,58

При калібруванні ДІВ в нормальних умовах від 15 °С до 25 °С, корегування по температурі не виконується. Відповідно до експлуатаційної документації на компаратор в цьому діапазоні температур відсутня додаткова похибка компаратора, викликана зміною температури від стандартної. Корируючі коефіцієнти до зміни тиску за даною методикою не застосовуються, так як вплив підвищеного тиску має значення тільки для герметичних виробів, а вплив пониженого тиску в нашій місцевості малоімовірний. Оцінюємо стандартні невизначеності вхідних величин.

Таблиця 4.3 – Оцінювання розширеної невизначеності результатів калібрування ДІВ

Складові невизначеності	Розраховане значення складової невизначеності
Невизначеність, що пов'язана з розсіюванням показів від джерела, що калібрують, та еталонного джерела розрахована по типу А	$\frac{u_A(\bar{R})}{R} = 1,51\%$
Невизначеність типу В, що вноситься еталоном	$\frac{u_B(A_{em})}{A_{em}} = 1,0\%$
Невизначеність типу В коригуючого коефіцієнта на розпад джерела	$\frac{u_B(K_\lambda)}{K_\lambda} = 0,58\%$
Невизначеність по типу В коригуючого коефіцієнта на мертвий час компаратора	$\frac{u_B(K_\tau)}{K_\tau} = 0,29\%$
Невизначеність по типу В компаратора	$\frac{u_B(K_K)}{K_K} = 0,69\%$
Сумарна відносна стандартна невизначеність мазка та джерела, що калібрується	$\begin{cases} u_c = 4,9\% \\ \frac{u_c(A_x)}{A_x} = 2,04\% \end{cases}$
Розширена невизначеність вимірювання активності мазка та джерела, що калібрується	$\begin{cases} U_M = 9,6\% \\ U_A = 4,1\% \end{cases}$
Активність джерела мазка та джерела, що калібрується	$\begin{cases} A_M = 0,5 \text{ Бк} \\ A_x = 16,1 \text{ Бк} \end{cases}$

4.2 Контроль рівномірності зовнішнього випромінення закритих джерел α -випромінення

Для проведення експериментальних досліджень альфа-джерел використовуємо вторинний еталон активності альфа-випромінення ВЕТУ 12-02-01-98, дозиметр-радіометр МКС-АТ1117М з блоками детектування БДПА-01

(компаратор) та БДПА-03 (компаратор) та технологічне обладнання, яке повинне бути відкаліброване в установленому порядку[78].

Першим етапом проводимо зовнішній огляд. Для цього перевіряємо маркування, зовнішній вигляд кожного джерела відповідно до технічної документації. При цьому повинно бути встановлено відповідність джерела наступним вимогам: відсутність механічних пошкоджень, чітке маркування.

Далі проводимо підготовку робочого місця та обладнання до роботи.

Для цього встановлюємо на робочому місці захисні екрани. Підбираємо відповідні підставки під джерела та діафрагми, що забезпечують геометрію вимірювання.

Порядок підготовки до роботи компаратора наведений в експлуатаційній документації.

На наступному етапі визначаємо метрологічні характеристики джерел альфа-випромінювання.

Для цього визначаємо активність альфа-джерел та розширену невизначеність. Дослідження проводимо за методикою МК-IR-02:2020 “Джерела іонізуючого випромінювання”[51].

Останнім етапом проводимо контроль рівномірності зовнішнього випромінювання джерел альфа-випромінювання. Дослідження проводимо за методикою визначеною ТУ 95 417-083 з застосуванням спеціальної діафрагми, що входить в комплектацію робочого місця. Рівномірність зовнішнього випромінювання повинна відповідати вимогам та бути не гірше 80 відсотків.

Для кожної i -ї серії вимірювання обчислюємо відношення R_i швидкості лічення імпульсів від джерела, n_{xi} , і еталонного джерела n_{ei} з поправками на фон. Активність еталонного джерела $A_{ет}$ беремо на дату складання протоколу.

Таблиця 4.4 – Формули, використані для розрахунку невизначеності результатів вимірювання метрологічних характеристик джерел α -випромінювання вторинного еталону

Параметри розрахунку невизначеності результатів вимірювання метрологічних характеристик джерел α -випромінювання вторинного еталону	Формула визначення
Відношення R_i швидкості рахування імпульсів	$R_i = \frac{(n_{xi} - n_{\phi i})}{(n_{ei} - n_{\phi i})}$
Середнє арифметичне значення відношення швидкостей рахування імпульсів	$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i$
Невизначеність, що пов'язана з розсіюванням показів від джерела, що калібрують, та еталонного джерела по типу А	$\frac{u_A}{\bar{R}} = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2}$
Невизначеність, що вноситься еталоном	$\frac{u_B}{A} = \frac{U_{er}}{2}$
Невизначеність коригуючого коефіцієнта на розпад джерела	$\frac{u_B}{K_\lambda} = \frac{\Delta_\lambda}{2\sqrt{3}}$
Невизначеність коригуючого коефіцієнта на систематичну похибку компаратора	$\frac{u_B}{K_K} = \frac{\Delta_K}{\sqrt{3}}$
Сумарна невизначеність вимірювання	$\frac{u_c}{A_x} = \sqrt{\frac{u_A(\bar{R})^2}{\bar{R}} + \frac{u_B(A_e)^2}{A_e} + \frac{u_B(K_\lambda)^2}{K_\lambda} + \frac{u_B(K_K)^2}{K_K}}$
Розширена невизначеність U калібрування (коефіцієнт охоплення стандартно приймається $k = 2$)	$U = k \times u_c$
Визначення активності	$A_x = A_e \times \bar{R} \times K_K \times K_\lambda$

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку невизначеності результатів вимірювання метрологічних характеристик джерел альфа-випромінення вторинного еталону

Тип джерела	$A_{\text{ет}}, \text{Бк}$	$\bar{R}, \text{с}^{-1}$	$\frac{u_A(\bar{R})}{\bar{R}}$	$\frac{u_B(A)}{A}$	$\frac{u_B(K_\lambda)}{K_\lambda}$	$\frac{u_B(K_K)}{K_K}$	$\frac{u_c(A_x)}{A_x}$	$U, \%$	$A_x, \text{Бк}$
1П9-251*	18,0	1,141	0,20	1,00	0,58	0,69	1,36	2,72	15,9
1П9-11**									
1П9-252*	211	1,007	0,24	1,00	0,58	0,69	1,37	2,74	213
1П9-12**									
1П9-253*	2100	0,904	0,06	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	1900
1П9-13**									
1П9-254*	22400	1,472	0,03	1,00	0,58	0,69	1,35	2,69	33000
1П9-14**									
2П9-251*	21,0	1,210	0,22	1,00	0,58	0,69	1,36	2,73	25,0
2П9-11**									
2П9-252*	228	1,010	0,05	1,00	0,58	0,69	1,35	2,69	230
2П9-12**									
2П9-253*	2040	1,247	0,12	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	2540
2П9-13**									
2П9-254*	23600	1,153	0,01	1,00	0,58	0,69	1,35	2,69	27200
2П9-14**									
3П9-251*	21,1	1,201	0,27	1,00	0,58	0,69	1,37	2,75	25,3
3П9-11**									
3П9-252*	229	1,094	0,17	1,00	0,58	0,69	1,36	2,71	251
3П9-12**									
3П9-253*	2470	1,067	0,02	1,00	0,58	0,69	1,35	2,69	2640
3П9-13**									
3П9-254*	23400	1,324	0,10	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	31000
3П9-14**									
4П9-251*	21,4	1,182	0,14	1,00	0,58	0,69	1,35	2,71	25,3
4П9-11**									
4П9-252*	202	1,242	0,13	1,00	0,58	0,69	1,35	2,71	251
4П9-12**									
4П9-253*	2320	1,150	0,02	1,00	0,58	0,69	1,35	2,69	2670
4П9-13**									
4П9-254*	22100	1,116	0,10	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	24700
4П9-14**									
5П9-251*	213	0,129	0,16	1,00	0,58	0,69	1,36	2,71	27,4
5П9-12**									
5П9-252*	213	1,218	0,08	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	259
5П9-12**									

Тип джерела	$A_{\text{ст}}, \text{Бк}$	$\bar{R}, \text{с}^{-1}$	$\frac{u_A(\bar{R})}{\bar{R}}$	$\frac{u_B(A)}{A}$	$\frac{u_B(K_\lambda)}{K_\lambda}$	$\frac{u_B(K_K)}{K_K}$	$\frac{u_c(A_x)}{A_x}$	$U, \%$	$A_x, \text{Бк}$
5П9-253*	2380	1,004	0,06	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	2390
5П9-13**									
5П9-254*	22700	0,9261	0,07	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	21000
5П9-14**									
5П9-255*	239000	1,3452	0,36	1,00	0,58	0,69	1,39	2,79	322000
5П9-15**									
6П9-251*	22,0	1,2750	0,23	1,00	0,58	0,69	1,37	2,73	28,1
6П9-11**									
6П9-252*	224	1,0478	0,17	1,00	0,58	0,69	1,36	2,72	235
6П9-12**									
6П9-253*	2400	1,0738	0,10	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	2580
6П9-13**									
6П9-254*	22600	1,1736	0,07	1,00	0,58	0,69	1,35	2,70	26500
6П9-14**									
6П9-255*	22600	10,6538	0,16	1,00	0,58	0,69	1,36	2,71	2410000
6П9-14**									

* - джерело, що калібрується; ** - еталонне джерело.

Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання джерел альфа-випромінювання.

Обладнання: дозиметр-радіометр МКС-АТ1117М з блоками детектування БДПА-01 та БДПА-03.

Умови проведення дослідження:

- температура – 20°C;
- вологість – 75%;
- тиск – 104 кПа.

Рівномірність зовнішнього випромінювання визначається за формулою:

$$\chi = \left(1 - \max \left(\frac{|n_k - \frac{1}{m_k} \sum n_k|}{\frac{1}{m_k} \sum n_k} \right) \right) \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Таблиця 4.6 – Результати контролю рівномірності
зовнішнього випромінення альфа джерел,
що входять до складу вторинного еталону

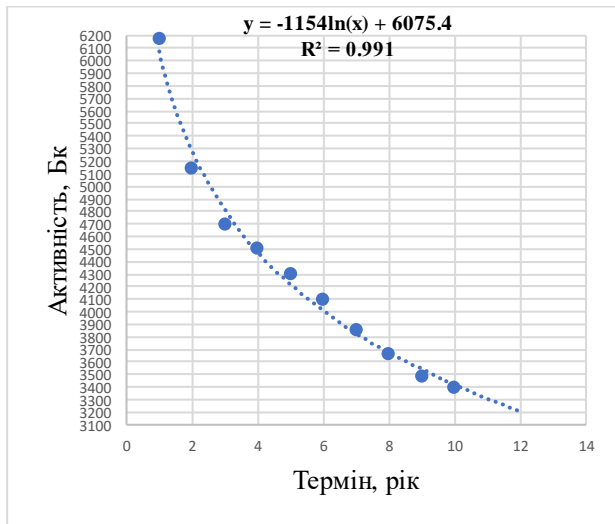
m_k	Положення джерела відносно вихідного положення в куті 2π , в градусах	Швидкість відліку n_1 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_2 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_3 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_4 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_5 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Σn_k	$\left n_k - \frac{1}{m_k} \sum n_k \right $	
Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання альфа джерела 5П9-253									
1	0	30,82	30,63	31,43	30,32	31,07	30,854	0,391	
2	45	31,62	31,31	31,23	31,11	30,45	31,144	0,101	
3	90	30,72	30,87	31,28	29,79	30,50	30,632	0,613	
4	135	31,84	33,25	31,96	33,32	33,24	32,350	-1,105	
5	180	29,78	29,43	29,59	31,23	29,52	29,910	1,335	
6	225	30,45	30,18	29,19	30,32	30,3	30,088	1,157	
7	270	32,75	32,45	31,76	32,67	31,51	32,345	-1,100	
8	315	32,48	32,23	33,94	32,14	32,40	32,638	-1,393	
Рівномірність зовнішнього випромінювання, % - 95,5							31,245	1,393	
Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання альфа джерела 5П9-254									
1	0	286,0	288,1	290,3	282,6	284,9	286,38	2,200	
2	45	307,8	308,2	309,5	307,4	306,5	307,88	-19,300	
3	90	276,2	272,4	271,9	272,5	274,4	273,48	15,100	
4	135	293,0	291,8	288,7	293,9	293,6	292,20	-3,620	
5	180	295,1	292,6	291,5	291,5	289,2	291,98	-3,400	
6	225	298,0	296,0	299,2	291,9	295,4	296,10	-7,520	
7	270	278,1	277,8	276,0	274,4	276,3	276,52	12,060	
8	315	285,1	284,1	281,9	285,1	284,3	284,10	4,480	
Рівномірність зовнішнього випромінювання, %							93,3	288,580	19,300
Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання альфа джерела 6П9-253									
1	0	22,80	21,77	21,08	22,06	21,69	21,880	-0,899	
2	45	21,45	22,35	22,19	22,44	22,82	22,250	-1,269	
3	90	18,79	17,75	18,50	18,34	18,42	18,360	2,621	
4	135	18,61	20,05	20,34	19,80	18,65	19,490	1,491	
5	180	21,21	19,92	20,64	21,94	21,95	21,132	-0,151	
6	225	23,72	21,47	23,01	22,70	22,38	22,656	-1,675	
7	270	20,81	19,88	21,16	21,30	20,09	20,648	0,333	
8	315	21,80	21,70	20,83	20,60	22,23	21,432	-0,451	
Рівномірність зовнішнього випромінювання, %							87,5	20,981	2,621
Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання альфа джерела 6П9-254									
1	0	236,63	240,09	240,30	240,26	237,38	238,932	-10,650	
2	45	222,27	221,09	224,23	220,87	222,85	222,262	6,020	
3	90	231,42	232,41	227,35	234,00	228,41	230,718	-2,436	

m_k	Положення джерела відносно вихідного положення в куті 2π , в градусах	Швидкість відліку n_1 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_2 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_3 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_4 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Швидкість відліку n_5 альфа-частинок за винятком фону, c^{-1}	Σn_k	$\left n_k - \frac{1}{m_k} \sum n_k \right $	
4	135	224,19	225,69	224,30	222,45	222,28	223,782	4,500	
5	180	231,87	233,58	235,34	234,66	232,62	233,614	-5,332	
6	225	231,10	229,40	228,32	226,76	231,94	229,504	-1,222	
7	270	219,25	218,12	217,57	217,88	224,12	219,388	8,894	
8	315	229,36	229,43	226,45	226,58	228,45	228,054	0,228	
Рівномірність зовнішнього випромінювання, %							95,3	228,282	10,650
Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання альфа джерела 6П9-255									
1	0	1835,8	1839,1	1883,1	1878,8	1821,3	1851,62	101,908	
2	45	1984,2	2029,7	2035,6	1972,6	1994,4	2003,30	-49,772	
3	90	1931,8	1959,1	1947,7	1931,0	1908,4	1935,60	17,928	
4	135	2072,6	2063,4	2073,9	2063,1	2092,0	2073,00	-119,473	
5	180	2022,0	2040,1	2003,3	2002,6	1983,3	2010,26	-56,732	
6	225	2069,0	2018,7	2026,1	2004,9	2005,6	2024,86	-71,332	
7	270	1862,4	1850,4	1886,5	1863,6	1885,9	1869,76	83,768	
8	315	1856,2	1878,0	1845,9	1850,3	1868,7	1859,82	93,708	
Рівномірність зовнішнього випромінювання, %							93,9	1953,528	119,473
Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання альфа джерела 4П9-253									
1	0	54,78	55,81	55,79	54,26	55,91	55,310	0,934	
2	90	59,17	56,86	56,56	56,74	56,55	57,176	-0,933	
3	180	56,17	55,66	55,12	55,39	54,35	55,338	0,905	
4	270	57,48	56,10	58,14	57,03	57,00	57,150	-0,907	
Рівномірність зовнішнього випромінювання, %							98,3	56,244	0,934
Контроль рівномірності зовнішнього випромінювання альфа джерела 4П9-254									
1	0	521,1	517,2	519,6	512,6	516,4	517,38	17,390	
2	90	519,2	518,6	518,3	511,2	513,3	516,12	18,650	
3	180	552,1	550,9	557,1	555,4	553,2	553,74	-18,970	
4	270	551,8	553,3	554,3	548,4	551,4	551,84	-17,070	
Рівномірність зовнішнього випромінювання, %							96,5	534,770	18,970

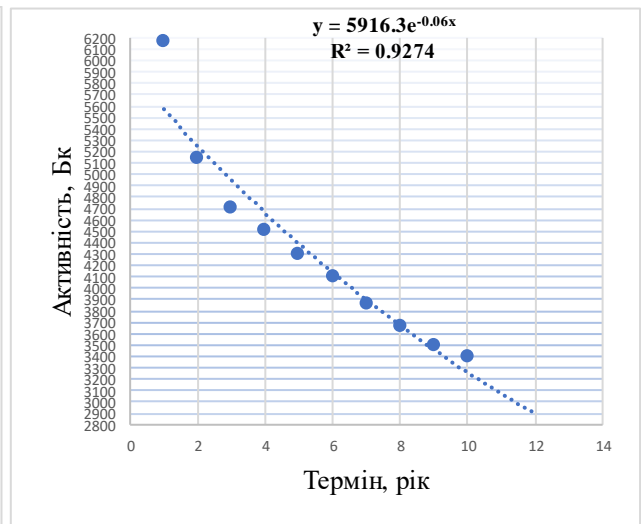
4.3 Приклади вибору функції для опису змін активності закритого ДІВ за результатами калібрування, для прогнозування строку служби закритого ДІВ

На рисунку 4.1 зображено моделювання активності закритого ДІВ за результатами калібрування з використанням функцій з прогнозуванням її зміни

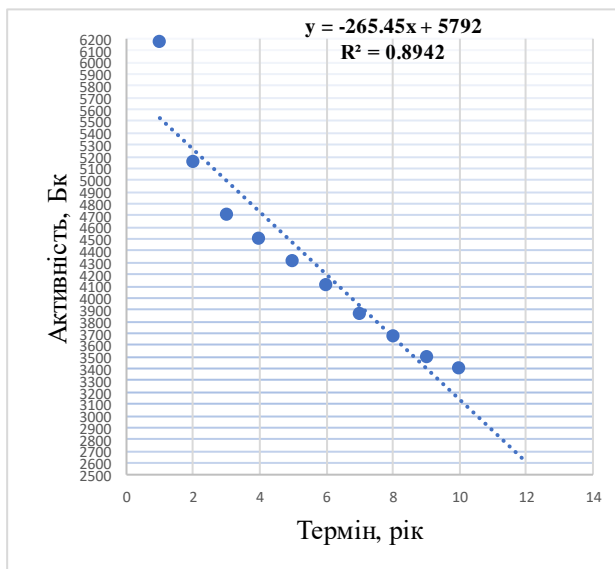
на два роки. Час прогнозування обраний два роки, що не перевищує 30% строку служби закритого ДІВ, який складає 10 років.



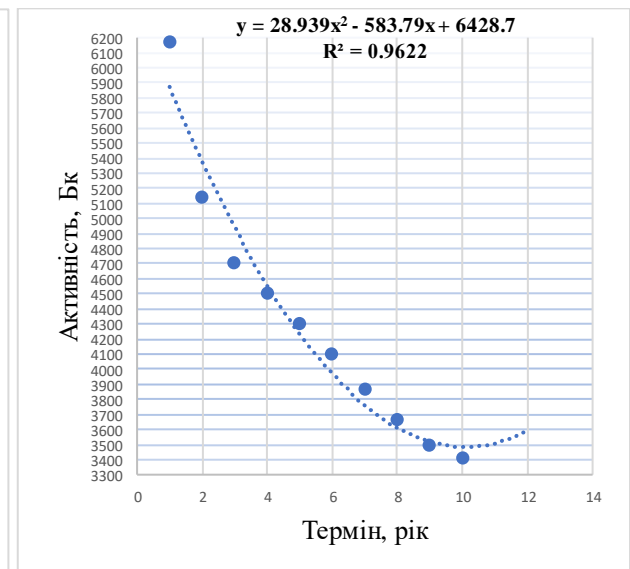
a



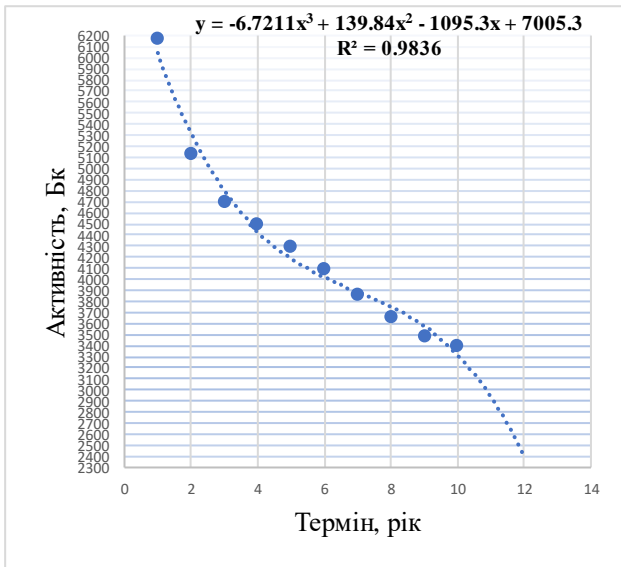
b



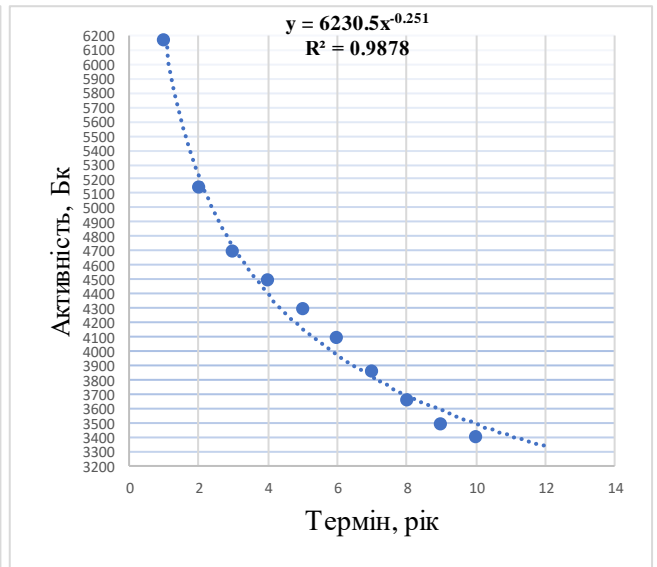
c



d



e



f

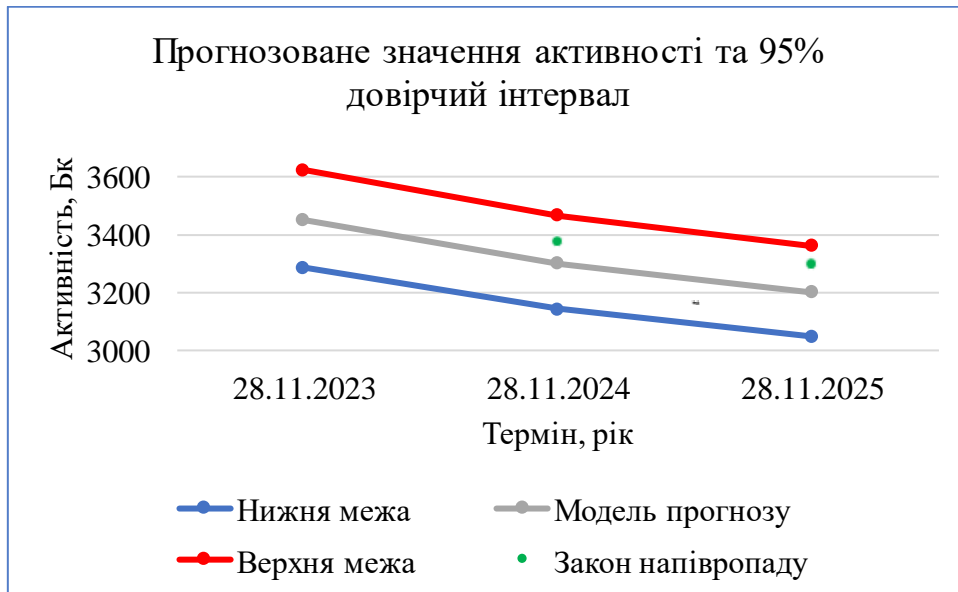


Рисунок 4.2 – Прогноз активності закритого ДІВ на два роки та 95% довірчий інтервал

Таблиця 4.7 - Отримані коефіцієнти детермінації для різних регресійних функцій

Функція	Коефіцієнт детермінації, R^2
Логарифмічна (a)	0,991
Експонентна (b)	0,927
Лінійна (c)	0,894
Поліноміальна 2 (d)	0,962
Поліноміальна 3 (e)	0,983
Степенева (f)	0,988

Отже в нашому випадку вибираємо логарифмічну функцію, так як значення коефіцієнту детермінації цієї функції має найменше відхилення від одиниці.

Висновки до розділу 4

Проведене оцінювання сумарної невизначеності ЗДІВ за результатами перевірки метрологічних характеристик та герметичності є підставою для прийняття рішення про результати калібрування.

Проведений контроль рівномірності зовнішнього випромінення закритих джерел α -випромінення, за результатами якого приймається рішення про герметичність ЗДІВ.

Проведений аналіз для вибору функції для опису змін активності закритого ДІВ за результатами калібрування, яка може бути використана для прогнозування строку служби ЗДІВ.

Висновки

На основі аналізу вимог нормативних документів встановлено можливість продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення.

Для прийняття рішення про продовження строку служби закритих ДІВ доцільним є застосування комплексного методу на основі:

- опрацювання результатів калібрування за строк служби закритого ДІВ;
- опрацювання результатів перевірки на герметичність закритого ДІВ;
- дослідження статистичної керованості метрологічних характеристик закритих ДІВ з використанням контрольних карт кумулятивних сум та проведення прогнозування зміни метрологічних характеристик ЗДІВ.

Інформація про збереження герметичності ЗДІВ дозволяє встановити збереження їх технічних характеристик та з врахуванням результатів калібрувань прийняття рішення щодо продовження строку служби ЗДІВ.

Вдосконалена методика калібрування закритих ДІВ додатково включає методику їх перевірки на герметичність, що відповідає вимогам міжнародних нормативних документів щодо закритих ДІВ та може бути використана як основа для прийняття рішення про продовження строку служби ЗДІВ.

Для прийняття рішення щодо подовження терміну експлуатації ЗДІВ доцільним є використання *cusum*-карт, які дають змогу швидко і точно визначити область змін процесу, контролювати статистичну керованість ЗДІВ, врахувати попередню інформацію про їх метрологічні характеристики.

Запропонований комплексний метод подовження строку служби джерела іонізуючого випромінення включає проведення планових калібрувань ЗДІВ протягом строку служби та формування їх бази даних, побудову *cusum*-карти та обтягої *V*-маски за результатами цих калібрувань з урахуванням дійсного значення активності ДІВ, перевірку на статистичну керованість процесу зміни метрологічних характеристик ЗДІВ, прогнозування активності радіонуклідів ЗДІВ на заданий період часу з використанням регресійного аналізу, перевірку

прогнозованих значень на статистичну керованість з метою прийняття рішення щодо продовження строку служби джерела на визначений час.

Час, на який може бути продовжений строк служби ЗДІВ не повинен перевищувати $1/3$ частину від бази прогнозу, яка використовується для перевірки статистичної керованості з допомогою контрольних карт кумулятивних сум. Протягом додаткового строку служби проводяться калібрування згідно встановленого графіку калібрувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кабінет Міністрів України ПОСТАНОВА від 3 серпня 2006 р. N 1092 Київ Про затвердження Державної програми забезпечення безпечного зберігання відпрацьованих високоактивних джерел іонізуючого випромінювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1092-2006-%D0%BF#Text> – Назва з екрану.
2. Технічний регламент закритих джерел іонізуючого випромінювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1382-2007-%D0%BF#Text>
3. МК-IR-01:2020 Засоби вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності, поверхневої густини потоку. Методика калібрування.
4. Берестов Р. В., Гоц Н. Є. Напрямки розвитку метрологічного забезпечення індивідуального дозиметричного контролю. XI Міжнародна науково-технічна конференція. Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2018) м. Харків http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/news/M-2018/MVT2018_Tezisy.pdf
5. Берестов Р., Гоц Н. Аналіз нормативного забезпечення спектрометрії іонізуючого випромінювання. IV Міжнародна науково-практична конференція. Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи. 2019 р. м. Львів https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2023/nov/32118/proceedingsqm2023_1.pdf
6. Берестов Р., Гоц Н. Стан метрологічного забезпечення спектрометрії іонізуючого випромінювання в Україні. Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019 (XXIII Міжнародний семінар метрологів МСМ'2019) м. Львів https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2019/15969/importantdoc/tezyk_onferenciyi.pdf
7. Гоц Н., Берестов Р. Методи вимірювання активності радіонуклідів. VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині

інформаційно-вимірювальних технологій та метрології. 2020 р. м. Славське
https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6423/1/Tezy_UKR-TUM-2020.pdf

8. Берестов Р. В., Гоц Н.Є. Методика продовження строку служби закритих джерел іонізуючого випромінення. XVIII Міжнародний науково-технічний семінар “Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні, прикладні та методичні аспекти” 2021 р. м. Харків

9. Берестов Р., Гоц Н. Програма комплексного обстеження закритих радіонуклідних джерел на герметичність. Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022” м. Львів
<https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2022/dec/29196/zbirnyk2022.pdf>

10. Берестов Р., Гоц Н. Розробка методу подовження терміну експлуатації джерел іонізуючого випромінювання за допомогою карт кумулятивних сум. VI Міжнародна науково-практична конференція. “Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи.” 2023 р. м. Львів.
<https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2023/31470/importantdoc/proceedingsqm2023.pdf>

11. Р. Берестов, І. Кравченко, Н. Гоц, В. Паракуда. Огляд системи метрологічного забезпечення спектрометрії іонізуючого α -, β -, Р. Берестов, Н. Гоц. Дослідження методів вимірювання активності радіонуклідів для калібрування джерел α -, β -, γ - випромінення. - Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 3, С. 14 – 23. DOI: 10.24025/2306-4412.3.2021.243580.

12. Р. Берестов, Н. Гоц. Дослідження методів вимірювання активності радіонуклідів для калібрування джерел α -, β -, γ - випромінення. - Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 3, С. 14 – 23. DOI: 10.24025/2306-4412.3.2021.243580.

13. Р. Берестов, Н. Гоц. Формування вимог до методики продовження терміну служби закритих джерел іонізуючого випромінення. - Методи та прилади контролю якості. 2021. № 2, С. 22 – 33. DOI: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-22-33.

14. Nataliya HOTS, Krzysztof PRZYSTUPA, Maryna MIKHALEWA, Berestov RUSLAN. Simulation of the influence of multiple reflections of background radiation on the thermography results. - PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. 2022 № 3. 177-120. DOI:10.15199/48.2022.03.27
15. Natalia Hots, Ruslan Berestov. Use of control charts of cumulative amounts for the method of extending the service life of the ionizing radiation source according to calibration results. - ITCMTM. 2024; Volume 85(1), Number 1: pp.10-15. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.01.010>
16. Берестов Р., Гоц Н., Рось Р. (2024). Дослідження метрологічних характеристик джерел альфа-випромінювання, що входять до складу вторинного еталону BETY 12-02-01-98. MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, (1), 39–44. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-5>
17. World Health Organization. Ionizing radiation, health effects and protective measures Ionizing radiation, health effects and protective measures [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures> – Назва з екрана.
18. Електроенергетика и охрана окружающей среды [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-3/3-2/3-2-5> Назва з екрана.
19. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту. — Под общей редакцией И.И. Линге и И.И. Крышева. — 2015 г. — 265 с.
20. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання: Закон України від 14.01.1998 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80/ed20230917#Text> – Назва з екрана.
21. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 08.02.1995 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

- <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80/ed19950208#Text> - Назва з екрана.
22. Б. Линделл, Р Добсон. Ионизирующая радиация и здоровье (Всемирная Организация Здравоохранения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39715/WHO_PHP_6_rus.pdf;jsessionid=CD1EAD3786D4F2E876C8E0689C927788?sequence=2 – Назва з екрана.
23. Последствия облучения для здоровья человека в результате Чернобыльской аварии. Научное приложение D к Докладу НКДАР ООН 2008 года Генеральной Ассамблее [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.unscear.org/docs/reports/2008/12-55525_Report_2008_Annex_D_RUSSIAN.pdf – Назва з екрана.
24. ISO 9978-2020 Radiation protection-- Sealed sources -- Leakage test methods [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/70598.html> – Назва з екрана.
25. МВ 12-01:2014 Інструкція з технічного обслуговування джерел іонізуючого випромінювання. Випробування радіонуклідних джерел іонізуючого випромінювання з метою визначення їх технічних характеристик та перевірки на герметичність.
26. Національний науковий центр «Інститут метрології. Іонізуючі випромінювання та ядерні константи [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=333> – Назва з екрана.
27. Неєжмаков П.І., Буняєва Ю.Ю. Аналіз структури еталонної бази України та участі України у ключових і додаткових звіряннях національних еталонів. - Український метрологічний журнал, 2015, № 4, с.3-9.
28. Про Державний реєстр джерел іонізуючого випромінювання [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://izotop.ua/ua/registr/about/> – Назва з екрана.
29. Про створення Державного реєстру джерел іонізуючого випромінювання [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/847-97-%D0%BF> – Назва з екрана.

30. Грабовський В.А. Прикладна спектроскопія йонізуючих випромінювань. Львів.: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008.-296 с.
31. Реєстр акредитованих випробувальних та калібрувальних лабораторій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://naau.org.ua/reyestr-akreditovanih-oov/> – Назва з екрана.
32. Левчук С. Довідник по основних методах визначення активності радіонуклідів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uiar.org.ua/Dovidnyk.pdf>. -Назва з екрана.
33. Конвенція про фізичний захист ядерного матеріалу та ядерних установок випромінювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_024#Text . -Назва з екрана.
34. Договір про нерозповсюдження ядерної зброї [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_098#Text -Назва з екрана.
35. Закон України “Про внесення змін до деяких законодавчих актів України у зв'язку з приєднанням України до Віденської конвенції про цивільну відповідальність за ядерну шкоду” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684/97-%D0%B2%D1%80#Text> -Назва з екрана.
36. Конвенція про ядерну безпеку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_023#Text -Назва з екрана.
37. Угода між Україною та Міжнародним агентством з атомної енергії про застосування гарантій у зв'язку з Договором про нерозповсюдження ядерної зброї [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_028#Text -Назва з екрана.
38. Про приєднання України до Спільного протоколу про застосування Віденської конвенції та Паризької конвенції: Постанова Кабінету Міністрів України від 29 січня 1999 р. N 108 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/108-99-%D0%BF#Text> -Назва з екрана.
39. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 08.02.1995 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

- <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80/ed20240101#Text> - Назва з екрана.
40. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/ed20231008#Text> -Назва з екрана.
41. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ – 97) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>
42. Про затвердження Правил ядерної та радіаційної безпеки при перевезенні радіоактивних матеріалів (ПБПРМ-2006): Наказ Державного комітету ядерного регулювання від 30.08.2006 р. №132 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1056-06#Text> -Назва з екрана.
43. Про технічні регламенти та оцінку відповідності: Закон України від 15.01.2015 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19/ed20150115#Text> -Назва з екрана.
44. ДСТУ ІЕС 61976:2014 Ядерне приладобудування. Спектрометрія. Визначення характеристик фону спектра в HPGe гамма-спектрометрії (ІЕС 61976:2000, IDT).
45. ДСТУ ІЕС 62139:2014 Ядерне приладобудування. Дозиметри гамма-випромінювання радіаційні переносні та спектрометри, використовувані для розвідувальних робіт. Визначення, вимоги та калібрування (ІЕС 62139:1993, IDT).
46. ДСТУ ІЕС 61275:2007 Прилади радіаційного захисту. Виявлення окремих радіонуклідів у навколишньому середовищі. In situ фотонна спектрометрична система із застосуванням германієвого детектора (ІЕС 61275:1997, IDT).
47. ДСТУ ІЕС 61145:2014 Калібрування та використання систем з іонізаційною камерою для аналізування радіонуклідів (ІЕС 61145:1992, IDT).
48. ДСТУ ISO 10703-2001 Захист від радіації. Визначання об'ємної активності радіонуклідів методом гамма-спектрометрії з високою роздільною здатністю (ISO 10703:1997, IDT).

49. ДСТУ ISO 14850-1:2014 Ядерна енергія. Вимірювання активності упаковок відходів. Частина 1. Гамма-спектрометрія з високою роздільною здатністю в інтегральному режимі з відкритою геометрією (ISO 14850-1:2004, IDT).
50. ДСТУ ISO 18589-4:2015 Вимірювання радіоактивності у довкіллі. Грунт. Частина 4. Вимірювання ізотопів плутонію (плутонію 238 та плутонію 239+240) методом альфа-спектрометрії (ISO 18589-4:2009, IDT).
51. МК-IR-02:2020 Джерела іонізуючого випромінювання. Методика калібрування. Методика калібрування.
52. Технічний регламент модулів оцінки відповідності та вимог щодо маркування національним знаком відповідності, які застосовуються в технічних регламентах з підтвердження відповідності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npas/3033051>
53. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 230 с.
54. Умови і вимоги безпеки (ліцензійні умови) провадження діяльності з використання джерел іонізуючого випромінювання.: Наказ Держатомрегулювання України від 02.12.02 р. № 125 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://snriu.gov.ua/npas/umovi-i-vimogi-bezpeki-litsenziyni-umovi-provazhennya-diyalnosti-z-vikoristannya-dzherel-ionizuyuchogo-viprominyuvannya> -Назва з екрана.
55. Stanislaw Plaska Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.-200.-873s.
56. ДСТУ ISO 9978:2014 Радіаційна безпека. Закриті радіоактивні джерела. Методи випробовування на витік (ISO 9978:1992, IDT)
57. Володарський Є. Т. Статистична обробка даних : [навчальний посібник] / Є. Т. Володарський, Л. О. Кошева. – К.: НАУ, 2008. – 307 с.
58. Повірка та калібрування засобів вимірювальної техніки на підприємстві: розв'язання наявних проблем. Ольга Малецька. Режим доступу <https://www.ipkm.org.ua/services> Назва з екрана.

59. Постанова Кабінету Міністрів України „Про затвердження переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці.” [Електронний ресурс] // № 374 від 4 червня 2015 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/374-2015-%D0%BF#Text> Назва з екрана.
60. ДСТУ ISO 10703-2001 Захист від радіації. Визначання об’ємної активності радіонуклідів методом гамма-спектрометрії з високою розподільною здатністю (ISO 10703:1997, IDT).
61. ISO 2919:2012 Radiological protection - Sealed radioactive sources - General requirements and classification. <https://www.iso.org/standard/54441.html>
62. М. Дорожовець, Опрацювання результатів вимірювань, Львів, Україна, Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2007.
63. ДСТУ ГОСТ 8.581:2004 Джерела альфа-випромінювання радіометричні еталонні. Методика повірки (ГОСТ 8.581-2003, IDT).
64. 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).
65. Методика обґрунтування рівнянь вимірювань та оцінки методичної складової похибки (невизначеності) результатів вимірювань : МІ 13.002- 2003. – Офіц. вид. – Харків : ХДНДІМ, 2003. – 11 с
66. Про затвердження державних санітарних правил "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України": наказ Міністерства охорони здоров'я від 02.02.2005 р. № 54 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text> - Назва з екрана.
67. ДСТУ ISO 7873:2004 (ISO 7873:1993, IDT) Статистичний контроль. Контрольні карти для арифметичного середнього з попереджувальними межами – 18 с.

68. Дядюра К.О., Нагорний В.М. Удосконалення методу контрольних карт на основі класифікуючої функції. Сучасні технології в машинобудуванні, 2013, вип. 8, с. 218-227.
69. Захожай В.Б., Чорний А.Ю. Статистичне забезпечення управління якістю: Навчальний посібник. – К.: Центр навчальної літератури, 2005. – 340 с.
70. Навчальний посібник «Статистичні методи контролю якості» для студентів спеціальності 073 «Менеджмент», 015 «Професійна освіта (економіка)». Укладач: Завгородня Є.Є. – Старобільськ: Альма-матер, 2017. – 74 с.
71. ДСТУ ISO 7870 – 4: 2016 Статистичний контроль. Карти контрольні. Частина 4. Карти кумулятивних сум. (ISO 7870 – 4:2011, IDT)
72. ДСТУ ISO/TR 7871:2004 (ISO/TR 7871:1997, IDT) Статистичний контроль. Контрольні карти кумулятивних сум. Настанови щодо контролю якості та аналізу даних з використанням методик CUSUM – 47 с.
73. Barbara Uliasz, Joanna Lewandowska, Rafał Matuła. Statistical approach to water exploitation management based on CUSUM analysis. – [Elektronnyi resurs] –Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100166>
74. William H. Woodall. The Design of CUSUM Quality Control Charts. – [Elektronnyi resurs] –Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1080/00224065.1986.11978994>
75. Vaidyanathan P.P. The Theory of Linear Prediction– [Elektronnyi resurs] –Rezhym dostupu: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=oYByEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=prediction&ots=bbIAqH2PIG&sig=5jxQR_pzztJirpIL-22ZrSKX3Ys&redir_esc=y#v=onepage&q=prediction&f=false
76. Tey W.Y., Che Sidik N.A., Asako Y., Muhieldeen M.W., Afshar O. Moving Least Squares Method and its Improvement: A Concise Review, J. Appl. Comput. Mech., 7(2), 2021, 883–889. <https://doi.org/10.22055/JACM.2021.35435.2652>
77. Nicholas Dainiak. Inferences, Risk Modeling, and Prediction of Health Effects of Ionizing Radiation. – [Elektronnyi resurs] –Rezhym dostupu:

<https://journals.lww.com/health->

[physics/abstract/2016/03000/inferences_risk_modeling_and_prediction_of.8.aspx](https://journals.lww.com/health-physics/abstract/2016/03000/inferences_risk_modeling_and_prediction_of.8.aspx)

78. V. Skliarov, K. Ozerskyi, A. Pystovyi. A Statistical Method for the Assessment of Metrological Characteristics of Reference Materials. Український метрологічний журнал. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300954>

79. М. Микийчук, Метрологічне забезпечення виробництва, Львів, Україна, Вид-во Львівської політехніки, 2017.

80. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008. – Sevres: JCGM, 2008. – 120 p.

81. Evaluation of measurement data – An introduction to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» and related documents : JCGM 104:2009. – Sevres: JCGM, 2009. – 20 p.

82. Про затвердження Вимог та умов безпеки (ліцензійних умов) провадження діяльності з виробництва джерел іонізуючого випромінювання: Наказ Державної інспекції ядерного регулювання України від 13.08.2015 р. № 148 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1054-15#Text> - Назва з екрана.

83. ДСТУ 8987:2020 Метрологія. Спектрометри енергій альфа-, бета-, гамма-випромінювання. Методика повірки.

84. IAEA Techdoc 1401, 2004-07, Quantifying uncertainty in nuclear analytically measurements. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1401_web.pdf

85. ДСТУ ІЕС/TR 62461:2014 Прилади радіаційного захисту. Визначення невизначеності вимірювань (ІЕС/TR 62461:2006;IDT).

86. ДСТУ 7216:2011 Прилади радіаційного контролю навколишнього середовища. Дозиметри та радіометри радіаційного контролю. Класифікація й загальні технічні вимоги.

87. Metrology et calendar-based calibrations, Instrumentation & Measurement magazine, vol. 20, no. 2, pp. 11-12, April 2017. Posted by J.-M. Pou, 16 May 2017 in Metrology.

88. Закон України. Про метрологію та метрологічну діяльність. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text> -Назва з екрана.
89. EA-4/02 M: 2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.isobudgets.com/pdf/uncertainty-guides/ea-4-02-m-2013-expression-of-the-uncertainty-of-measurement-in-calibration.pdf> - Назва з екрана.
90. JCGM GUM-6:2020 Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM_GUM_6_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337 -Назва з екрана.
91. ISO/IEC Guide 98-4:2012 Uncertainty of measurement. Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/50465.html> - Назва з екрана.
92. Про затвердження Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки: Постанова Кабінету Міністрів України від 13.01.2016 № 94. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94-2016-%D0%BF#Text> - Назва з екрана.
93. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT).
94. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology. – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – JCGM. – 2008. – 90 p.
95. Jeff E. Houlahan, Shawn T. McKinney, T. Michael Anderson, Brian J. McGill. The priority of prediction in ecological understanding. – [Elektronnyi resurs] –Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1111/oik.03726>.
96. M. Brzeziński. Application of \bar{x} / m_r and cusum control charts to evaluate the quality of cast steel in induction furnaces. – [Elektronnyi resurs] –Rezhym dostupu: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/118914/edition/103464/content>

97. ISO 7870-2:2023 Control charts. Part 2: Shewhart control charts. – [Elektronnyi resurs] –
Rezhym dostupu: <https://www.iso.org/standard/78859.html>
98. ISO 22514-2:2017 Statistical methods in process management. Capability and performance.
Part 2: Process capability and performance of time-dependent process models. – [Elektronnyi
resurs] –Rezhym dostupu: <https://www.iso.org/standard/71617.html>
99. V. Lacoste, Review of radiation sources, calibration facilities and simulated
workplace fields. [Elektronnyi resurs] –Rezhym dostupu:
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.05.036>
100. Stump, K.E., DeWerd, L.A., Micka, J.A. and Anderson, D.R. (2002), Calibration
of new high dose rate sources. Med. Phys., 29: 1483-1488. Elektronnyi resurs] –
Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1118/1.1487860>
101. Nicholas Dainiak. Inferences, Risk Modeling, and Prediction of Health Effects of
Ionizing Radiation. – [Elektronnyi resurs] –Rezhym
dostupu: [https://journals.lww.com/health-
physics/abstract/2016/03000/inferences_risk_modeling_and_prediction_of.8.aspx](https://journals.lww.com/health-physics/abstract/2016/03000/inferences_risk_modeling_and_prediction_of.8.aspx)

ДОДАТКИ

ДОДАТОК 1

ЗНАЧЕННЯ
величини D1 для окремих радіонуклідів

Таблиця 2

Радіонуклід ^a	D ТБк	Радіонуклід	D ТБк	Радіонуклід	D ТБк
H-3	2.E+03	Rh-105	9.E-01	Ta-182	6.E-02
Be-7	1.E+00	Pd-103	9.E+01	W-178	9.E-01
Be-10	3.E+01	Pd-107		W-181	5.E+00
C-11	6.E-02	Pd-109	2.E+01	W-185	1.E+02
C-14	5.E+01	Ag-105	1.E-01	W-187	1.E-01
N-13	6.E-02	Ag-108m	4.E-02	W-188	1.E+00
F-18	6.E-02	Ag-110m	2.E-02	Re-184	8.E-02
Na-22	3.E-02	Ag-111	2.E+00	Re-184m	7.E-02
Na-24	2.E-02	Cd-109	2.E+01	Re-186	4.E+00
Mg-28	2.E-02	Cd-113m	4.E+01	Re-187	
Al-26	3.E-02	Cd-115	2.E-01	Re-188	1.E+00

Si-31	1.E+01	Cd-115m	3.E+00	Re-189	1.E+00
Si-32	7.E+00	In-111	2.E-01	Os-185	1.E-01
P-32	1.E+01	In-113m	3.E-01	Os-191	2.E+00
P-33	2.E+02	In-114m	8.E-01	Os-191m	1.E+00
S-35	6.E+01	In-115m	4.E-01	Os-193	1.E+00
Cl-36	2.E+01	Sn-113	3.E-01	Os-194	7.E-01
Cl-38	5.E-02	Sn-117m	5.E-01	Ir-189	1.E+00
Ar-37		Sn-119m	7.E+01	Ir-190	5.E-02
Ar-39	3.E+02	Sn-121m	7.E+01	Ir-192	8.E-02
Ar-41	5.E-02	Sn-123	7.E+00	Ir-194	7.E-01
K-40		Sn-125	1.E-01	Pt-188	4.E-02
K-42	2.E-01	Sn-126	3.E-02	Pt-191	3.E-01
K-43	7.E-02	Sb-122	1.E-01	Pt-193	3.E+03
Ca-41		Sb-124	4.E-02	Pt-193m	1.E+01
Ca-45	1.E+02	Sb-125	2.E-01	Pt-195m	2.E+00
Ca-47	6.E-02	Sb-126	2.E-02	Pt-197	4.E+00
Sc-44	3.E-02	Te-121	1.E-01	Pt-197m	9.E-01
Sc-46	3.E-02	Te-121m	1.E-01	Au-193	6.E-01
Sc-47	7.E-01	Te-123m	6.E-01	Au-194	7.E-02
Sc-48	2.E-02	Te-125m	1.E+01	Au-195	2.E+00
Ti-44	3.E-02	Te-127	1.E+01	Au-198	2.E-01
V-48	2.E-02	Te-127m	3.E+00	Au-199	9.E-01
V-49	2.E+03	Te-129	1.E+00	Hg-194	7.E-02
Cr-51	2.E+00	Te-129m	1.E+00	Hg-195m	2.E-01
Mn-52	2.E-02	Te-131m	4.E-02	Hg-197	2.E+00
Mn-53		Te-132	3.E-02	Hg-197m	7.E-01
Mn-54	8.E-02	I-123	5.E-01	Hg-203	3.E-01
Mn-56	4.E-02	I-124	6.E-02	Tl-200	5.E-02
Fe-52	2.E-02	I-125	2.E-01	Tl-201	1.E+00
Fe-55	8.E+02	I-126	1.E-01	Tl-202	2.E-01
Fe-59	6.E-02	I-129		Tl-204	2.E+01
Fe-60	6.E-02	I-131	2.E-01	Pb-201	9.E-02
Co-55	3.E-02	I-132	3.E-02	Pb-202	2.E-01
Co-56	2.E-02	I-133	1.E-01	Pb-203	2.E-01
Co-57	7.E-01	I-134	3.E-02	Pb-205	
Co-58	7.E-02	I-135	4.E-02	Pb-210	3.E-01
Co-58m	7.E-02	Xe-122	6.E-02	Pb-212	5.E-02

Co-60	3.E-02	Xe-123	9.E-02	Bi-205	4.E-02
Ni-59	1.E+03	Xe-127	3.E-01	Bi-206	2.E-02
Ni-63	6.E+01	Xe-131m	1.E+01	Bi-207	5.E-02
Ni-65	1.E-01	Xe-133	3.E+00	Bi-210	8.E+00
Cu-64	3.E-01	Xe-135	3.E-01	Bi-210m	3.E-01
Cu-67	7.E-01	Cs-129	3.E-01	Bi-212	5.E-02
Zn-65	1.E-01	Cs-131	2.E+01	Po-210	6.E-02
Zn-69	3.E+01	Cs-132	1.E-01	At-211	5.E-01
Zn-69m	2.E-01	Cs-134	4.E-02	Rn-222	4.E-02
Ga-67	5.E-01	Cs-135	4.E-02	Ra-223	1.E-01
Ga-68	7.E-02	Cs-136		Ra-224	5.E-02
Ga-72	3.E-02	Cs-137	3.E-02	Ra-225	1.E-01
Ge-68	7.E-02	Ba-131	1.E-01	Ra-226	4.E-02
Ge-69	7.E-02	Ba-133	2.E-01	Ra-228	3.E-02
Ge-71	1.E+03	Ba-133m	3.E-01	Ac-225	9.E-02
Ge-77	6.E-02	Ba-140	3.E-02	Ac-227	4.E-02
As-72	4.E-02	La-137	2.E+01	Ac-228	3.E-02
As-73	4.E+01	La-140	3.E-02	Th-227	8.E-02
As-74	9.E-02	Ce-139	6.E-01	Th-228	4.E-02
As-76	2.E-01	Ce-141	1.E+00	Th-229	1.E-02
As-77	8.E+00	Ce-143	3.E-01	Th-230	7.E-02
Se-75	2.E-01	Ce-144	9.E-01	Th-231	1.E+01
Se-79	2.E+02	Pr-142	1.E+00	Th-232	
Br-76	3.E-02	Pr-143	3.E+01	Th-234	2.E+00
Br-77	2.E-01	Nd-147	6.E-01	Pa-230	1.E-01
Br-82	3.E-02	Nd-149	2.E-01	Pa-231	6.E-02
Kr-81	3.E+01	Pm-143	2.E-01	Pa-233	4.E-01
Kr-85	3.E+01	Pm-144	4.E-02	U-230	4.E-02
Kr-85m	5.E-01	Pm-145	1.E+01	U-232	6.E-02
Kr-87	9.E-02	Pm-147	4.E+01	U-233	7.E-02
Rb-81	1.E-01	Pm-148m	3.E-02	U-234	1.E-01
Rb-83	1.E-01	Pm-149	6.E+00	U-235	8.E-05
Rb-84	7.E-02	Pm-151	2.E-01	U-236	2.E-01
Rb-86	7.E-01	Sm-145	4.E+00	U-238	
Rb-87		Sm-147		пропорция U	
Sr-82	6.E-02	Sm-151	5.E+02	обедненный U	
Sr-85	1.E-01	Sm-153	2.E+00	обараченай U 10-20 ниссонкин	8.E-04

Sr-85m	1.E-01	Eu-147	2.E-01		
Sr-87m	2.E-01	Eu-148	3.E-02	αβγδδεεζηθ U>20 ηζθσςτϑι	8.E-05
Sr-89	2.E+01	Eu-149	2.E+00	Np-235	1.E+02
Sr-90	1.E+00	Eu-150b	2.E+00	Np-236 b	7.E-03
Sr-91	6.E-02	Eu-150a	5.E-02	Np-236a	8.E-01
Sr-92	4.E-02	Eu-152	6.E-02	Np-237	7.E-02
Y-87	9.E-02	Eu-152m	2.E-01	Np-239	5.E-01
Y-88	3.E-02	Eu-154	6.E-02	Pu-236	1.E-01
Y-90	5.E+00	Eu-155	2.E+00	Pu-237	2.E+00
Y-91	8.E+00	Eu-156	5.E-02	Pu-238	6.E-02
Y-91m	1.E-01	Gd-146	3.E-02	Pu-239	6.E-02
Y-92	2.E-01	Gd-148	4.E-01	Pu-240	6.E-02
Y-93	6.E-01	Gd-153	1.E+00	Pu-241	3.E+00
Zr-88	2.E-02	Gd-159	2.E+00	Pu-242	7.E-02
Zr-93		Tb-157	1.E+02	Pu-244	3.E-04
Zr-95	4.E-02	Tb-158	9.E-02	Am-241	6.E-02
Zr-97	4.E-02	Tb-160	6.E-02	Am-242m	3.E-01
Nb-93m	3.E+02	Dy-159	6.E+00	Am-243	2.E-01
Nb-94	4.E-02	Dy-165	3.E+00	Am-244	9.E-02
Nb-95	9.E-02	Dy-166	1.E+00	Cm-240	3.E-01
Nb-97	1.E-01	Ho-166	2.E+00	Cm-241	1.E-01
Mo-93	3.E+02	Ho-166m	4.E-02	Cm-242	4.E-02
Mo-99	3.E-01	Er-169	2.E+02	Cm-243	2.E-01
Tc-95m	1.E-01	Er-171	2.E-01	Cm-244	5.E-02
Tc-96	3.E-02	Tm-167	6.E-01	Cm-245	9.E-02r
Tc-96m	3.E-02	Tm-170	2.E+01	Cm-246	2.E-01
Tc-97		Tm-171	3.E+02	Cm-247	1.E-03
Tc-97m	4.E+01	Yb-169	3.E-01	Cm-248	5.E-03
Tc-98	5.E-02	Yb-175	2.E+00	Bk-249	1.E+01
Tc-99	3.E+01	Lu-172	4.E-02	Bk-250	8.E-02
Tc-99m	7.E-01	Lu-173	9.E-01	Cf-248	1.E-01
Ru-97	3.E-01	Lu-174	8.E-01	Cf-249	1.E-01
Ru-103	1.E-01	Lu-174m	6.E-01	Cf-250	1.E-01
Ru-105	8.E-02	Lu-177	2.E+00	Cf-251	1.E-01
Ru-106	3.E-01	Hf-172	4.E-02	Cf-252	2.E-02
Rh-99	1.E-01	Hf-175	2.E-01	Cf-253	4.E-01
Rh-101	3.E-01	Hf-181	1.E-01	Cf-254	3.E-04

Rh-102	3.E-02	Hf-182	5.E-02	²³⁸ Pu/Be	6.E-02
Rh-102m	1.E-01	Ta-178a	7.E-02	²⁴¹ Am/Be	6.E-02
Rh-103m	9.E+02	Ta-179	6.E+00		

¹ Більш детальна інформація про D-величину зазначена в документі МАГАТЕ "Шкідлива кількість радіоактивного матеріалу (D-величини)", видана 2010 року.

(Додаток 2 в редакції Постанови КМ № 453 від 26.06.2013)

**МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ
ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ, ПИТОМОЇ
(ОБ'ЄМНОЇ) АКТИВНОСТІ, ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ
ПОТОКУ ЧАСТИНОК**

ЗМІСТ

с

Скорочення та визначення	
Специфікація вимог	
1 Вступ	
1.1 Призначення	
2 Нормативні посилання	
3 Операції калібрування.....	
4 Засоби калібрування.....	
5 Вимоги до кваліфікації персоналу	
6 Вимоги безпеки	
7 Умови проведення калібрування	
8 Поводження з об'єктом калібрування	
9 Підготовка до проведення калібрування.....	
10 Проведення калібрування	
11 Опис процесу калібрування і подання його моделі.....	
12 Обробка результатів вимірювань та розрахунок невизначеностей ЗВТ .	
13 Оформлення результатів калібрування	
Додаток 1	
Додаток 2	

Скорочення та визначення.

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки.

ЕД – експлуатаційна документація.

РДСП – радіонуклідне джерело спеціального призначення.

ОИСН – объёмный источник специального назначения.

ОСГИ – образцовый спектрометрический источник гамма-излучения.

ДІВ – джерела іонізуючого випромінювання

Невизначеність вимірювання – параметр, що пов'язаний з результатом вимірювання і характеризує розсіювання значень, котрі обґрунтовано могли б бути приписані вимірюваній величині.

Похибка вимірювання – відхилення результату вимірювання від істинного (дійсного) значення вимірюваної величини.

Стандартна невизначеність – невизначеність результату вимірювання, виражена у вигляді середнього квадратичного відхилення.

Сумарна стандартна невизначеність – стандартна невизначеність результату вимірювання, отриманого через значення інших величин, і дорівнює позитивному квадратному кореню суми членів, при чому члени являються дисперсіями чи кореляціями цих інших величин, зваженими у відповідності з тим, як результат вимірювання змінюється при зміні цих величин.

Розширена невизначеність – величина, яка визначає інтервал, в межах якого, як можна очікувати, знаходиться більша частина розподілу значень, котрі з достатнім на те обґрунтуванням можуть бути приписані вимірюваній величині.

СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИМОГ

Методика повинна забезпечувати калібрування засобів вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності, поверхневої густини потоку частинок з наступними параметрами:

- засобів вимірювання активності від 5 Бк до $8,9 \times 10^7$ Бк із застосуванням каліброваних еталонних ДІВ відповідної геометрії;
- засобів вимірювання питомої (об'ємної) активності від 8,3 Бк/кг до $2,3 \times 10^5$ Бк/кг (8,3 Бк/л до $2,3 \times 10^5$ Бк/л) із застосуванням каліброваних еталонних ДІВ відповідної геометрії;
- засобів вимірювання поверхневої густини потоку частинок від $5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$ до $3,3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$, із застосуванням каліброваних еталонних ДІВ.

Невизначеності вимірювань параметрів, що визначаються під час калібрування за цією методикою, наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Параметр, що визначається під час калібрування	Діапазон вимірювань	Значення розширеної невизначеності вимірювань
Активність	від 5 Бк до $8,9 \times 10^7$ Бк	(5-20) %
Питома (об'ємна) активність	від 8,3 Бк/кг до $2,3 \times 10^5$ Бк/кг (8,3 Бк/л до $2,3 \times 10^5$ Бк/л)	(10-20) %
Поверхнева густина потоку частинок	від $5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$ до $3,3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$	(5-20) %

1 Вступ

Дана методика визначає порядок проведення, зміст і об'єм робіт по виконанню калібрування універсальних спектрометричних комплексів, радіометрів, спектрометрів.

1.1 Призначення

Ця методика розповсюджується на засоби вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності, поверхневої густини потоку частинок (далі по тексту – ЗВТ), призначені для ідентифікації радіонуклідів та вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності та зовнішнього поверхневого забруднення радіонуклідами.

2 Нормативні посилання

- 2.1 ДСТУ 3743-98 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання активності, питомої активності радіонуклідів.
- 2.2 ДСТУ-Н РМГ 43-2006 Метрологія. Застосування “Руководства по выражению неопределённости измерений” (РМГ 43-2001, IDT).
- 2.3 ДСТУ ISO/TS 21749:2013 Невизначеність вимірювання в метрологічній практиці. Повторні вимірювання та ієрархічні експерименти (ISO/TS 21749:2005, IDT)
- 2.4 ДСТУ ISO 10703-2001 Захист від радіації. Визначання об'ємної активності радіонуклідів методом гамма-спектрометрії з високою роздільною здатністю (ISO 10703:1997, IDT)
- 2.5 ДСТУ ISO 14850-1:2014 Ядерна енергія. Вимірювання активності упаковок відходів. Частина 1. Гамма-спектрометрія з високою роздільною здатністю в інтегральному режимі з відкритою геометрією (ISO 14850-1:2004;IDT)
- 2.6 ДСТУ ISO 7503-1-2001 Захист від радіації. Оцінювання забрудненості поверхні. Частина 1. Бета-випромінювачі (максимальна енергія бета-випромінювання понад 0.15MeV) та альфа випромінювачі (ISO 7503-

1:1988, IDT)

2.7 ЕА-4/02 М: 2013 “Вираження невизначеності вимірювання при калібруванні”

2.8 ПМ ХА 33.1405-2005 Рекомендация. Оценивание неопределенности при проведении метрологических работ.

2.9 ОСПУ-2005 “Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України”

2.10 НРБУ-97 “Норми радіаційної безпеки України”

2.11 «Інструкції з радіаційної безпеки для персоналу

«КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

3 Операції калібрування

При проведенні калібрування виконують наступні операції:

- зовнішній огляд;
- опробування;
- визначення активності, питомої або об’ємної активності, поверхневої густини потоку частинок;
- обробка результатів вимірювань та розрахунок невизначеності вимірювання при калібруванні ЗВТ.

4 Засоби калібрування

При проведенні калібрування використовують еталонне та допоміжне обладнання, які повинні мати відповідні сертифікати калібрування:

4.1 Набір еталонних джерел альфа-випромінювання. Розширена невизначеність (2 - 4) % ($k=2$, $P=0,95$).

4.2 Набір еталонних джерел бета-випромінювання. Розширена невизначеність (2 - 4) % ($k=2$, $P=0,95$).

4.3 Набір еталонних джерел спеціального призначення. Розширена невизначеність (3 - 7) % ($k=2$, $P=0,95$).

4.4 Термометр з діапазоном вимірювання температури навколишнього середовища від 0 °С до 50 °С.

4.5 Гігрометр з діапазоном вимірювання вологості повітря від 30% до 80%.

4.6 Барометр з діапазоном з діапазоном вимірювання тиску від 86 до 106 кПа.

4.7 Вимірювач потужності дози фотонного випромінювання в діапазоні від 0,10 мкЗв/год до 1,0 мЗв/год.

4.8 Ваги електронні для статичного зважування 3 класу точності з найбільшою границею зважування 5000 г.

Еталонні ЗВТ, що використовуються для калібрування універсальних спектрометричних комплексів, радіометрів, спектрометрів наведені в Додатку 2 таблиці Д2.1. Допоміжне обладнання, що використовується для калібрування ЗВТ наведені в Додатку 2 таблиці Д2.2.

Допускається застосування іншого еталонного обладнання, метрологічні параметри та характеристики яких не гірші за ті, що наведені в Додатку 2.

5 Вимоги до кваліфікації персоналу

5.1 За цією методикою можуть працювати фахівці, що мають вищу, або середню технічну освіту, щорічно проходять перевірку знань з техніки безпеки, вивчили діючі рекомендації та уповноважені на виконання даного виду робіт.

5.2 Працівники, що проводять калібрування, повинні знати принцип дії і конструкцію приладів, що застосовуються під час калібрування.

5.3 До проведення калібрування допускаються спеціалісти, що відносяться до персоналу категорії А, і мають досвід роботи з калібрування ЗВТ, не менше 1 року.

6 Вимоги безпеки

6.1 При проведенні калібрування необхідно дотримуватись вимог ОСПУ-2005 “Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України”, НРБУ-97 “Норми радіаційної безпеки України”, а також вимог безпеки, що наведені в експлуатаційній документації ЗВТ і допоміжного обладнання.

7 Умови проведення калібрування

Калібрування ЗВТ проводять при наступних умовах:

- температура навколишнього середовища – від 15 до 25°C;
- відносна вологість повітря – від 30 до 80%;
- атмосферний тиск – від 86 до 106 кПа.
- потужність еквівалентної дози на робочому місці не більше 0,25 мкЗв/ч.

Умови калібрування можуть бути визначені технічним завданням.

8 Поводження з об'єктом калібрування

Отримання, поводження, зберігання, транспортування ДІВ, які надходять на калібрування виконують відповідно до процедури системи управління якістю ПСУ-5.8/01-2016 та з дотриманням вимог «Інструкції з радіаційної безпеки для персоналу ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ».

9 Підготовка до проведення калібрування

9.1 ЗВТ повинні бути підготовлені до калібрування у відповідності до їх експлуатаційної документації (далі – ЕД).

9.2 ЗВТ перед калібруванням повинні знаходитися в кліматичних умовах, що вказані в п. 7, до встановлення робочого режиму (час встановлення робочого режиму ЗВТ вказується в ЕД на ЗВТ).

10 Проведення калібрування

10.1 Зовнішній огляд

Зовнішній огляд спектрометрів та спектрометричних комплексів проводять візуально.

Результати вважаються задовільними, якщо під час зовнішнього огляду встановлено:

- наявність ЕД на спектрометр енергій альфа-, бета-, гамма-випромінення, що подається на перевірку;
- відповідність комплектності спектрометра енергій альфа-, бета-, гамма-випромінення, що подається на перевірку, ЕД на спектрометр;

- відсутність дефектів, що ускладнюють зчитування маркування спектрометра;
- відповідність маркування ЕД на спектрометр;
- відсутність зовнішніх пошкоджень спектрометра;
- відсутність дефектів, що ускладнюють зчитування показань спектрометра.
- зручність розміщення спектрометра та дотримання вимог безпеки;
- надійність контактів підключення мережі живлення 220 В, 50 Гц і наявність заземлення;
- відсутність пошкоджень з'єднувальних кабелів, відсутність забруднення роз'ємів і надійність їх приєднання.

Зовнішній огляд радіометрів проводять візуально.

Результати вважаються задовільними, якщо під час зовнішнього огляду встановлено:

- наявність пломб, установлених під час монтажу на місці експлуатації, у місцях пломбування, що визначені експлуатаційними документами на радіометри з метою недопущення несанкціонованого втручання;
- відсутність зовнішніх пошкоджень радіометрів;
- відсутність дефектів відлікового пристрою, що ускладнюють зчитування показів радіометрів;
- відсутність дефектів, що ускладнюють зчитування маркування радіометрів;
- наявність чіткого зображення написів на відліковому пристрої радіометрів;

10.2 Опробування

Опробування спектрометрів та спектрометричних комплексів проводять після закінчення часу встановлення робочого режиму.

Опробування проводиться таким чином:

- підготувати спектрометр до роботи згідно з ЕД, включити його та завантажити для виконання ПЗ спектрометра. Наступні операції проводити після прогрівання, тривалість якого встановлена в ЕД.

- встановити в дистансерний пристрій кожного з вимірювальних каналів відповідні контрольні радіонуклідні джерела та провести градування по енергії.

- результати перевірки вважаються позитивними, якщо градування по енергії по кожному каналу пройшло в штатному режимі.

При опробуванні радіометрів здійснюють такі операції:

- підготовка радіометра до вмикання згідно експлуатаційної документації;
- вмикання, прогрів протягом часу, що вказано в експлуатаційної документації;

- контролювання рівня власного фону радіометра згідно вимог експлуатаційних документів;

- контролювання наявності реакції радіометра на опромінення детектора джерелом альфа- або бета- випромінення, поверхнева густина потоку частинок альфа- або бета- випромінення від якого у 3 рази перевищує нижню границю діапазону вимірювання радіометра.

Для проведення опробування ЗВТ використовують контрольні ДІВ, що входять в комплект ЗВТ, або використовують еталонні ДІВ з комплекту ОСГИ (для гамма-випромінювання), ^{239}Pu із комплекту П9 (альфа-випромінювання) або $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ із комплекту СО (бета-випромінювання). При цьому необхідно впевнитись, що сигнали від детектора реєструються вимірювальним приладом.

11 Опис процесу калібрування і подання його моделі

Невизначеність результату калібрування визначають у відповідності з ДСТУ–Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування “Руководство по выражению неопределенности в измерениях”.

Результати оформлюють протоколом за формою Додатка А.

При проведенні калібрування ЗВТ проводиться оцінка розширеної невизначеності при вимірюванні активності, питомої (об'ємної) активності, поверхневої густини потоку частинок радіонуклідів. Для визначення невизначеності в діапазоні вимірювання ЗВТ проводиться калібрування в не менш, ніж 3 точках діапазону (рекомендовані точки 0,3, 0,5, 0,8 діапазону), або визначених в заявці власника ЗВТ, та оцінюється невизначеність калібрування в кожній точці та /або діапазоні калібрування.

11.1 Калібрування спектрометрів, спектрометричних комплексів, радіометрів питомої активності.

Для визначення активності або питомої активності застосовують калібровані за активністю або питомою активністю радіонуклідів еталонні джерела ОСГИ, ОСАИ, ОИСН та інші, визначені геометрією вимірювання ЗВТ. Джерело встановлюють в пристрій детектування ЗВТ. В кожній точці діапазону вимірювання проводять не менше 5 вимірювань, X_i від кожного еталонного ДІВ.

В процесі калібрування ЗВТ для вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності здійснюється визначення коефіцієнта калібрування. Схема калібрування наведена малюнку 1.

Модельне рівняння має вигляд:

$$N = \frac{A_0 \cdot k_\lambda}{\bar{X}} \quad (1)$$

де N – калібровочний коефіцієнт;

A_0 – номінальне значення активності, питомої (об'ємної) активності радіонукліда еталонного джерела спеціального призначення; k_λ – коригуючий коефіцієнт на розпад джерела;

11.2 Калібрування радіометрів забрудненості альфа- та/або бета-активними речовинами:

Для визначення поверхневої густини потоку частинок застосовують калібровані за активністю або потоком частинок у кут 2π еталонні джерела типу П9, СО або аналогічні. Пристрій детектування встановлюють на джерело. В кожній точці діапазону вимірювання проводять не менше 5 вимірювань, ϕ_i від кожного еталонного ДІВ.

Якщо площа активної поверхні джерела менше площі, що фіксується блоком детектування, вимірювання проводять при декількох положеннях джерела в межах цієї площі.

Якщо площа активної поверхні джерела більш ніж в 1,5 рази перевищує площу, яка фіксується блоком детектування, вимірювання проводять при декількох положеннях детектора в межах активної поверхні джерела.

Число положень джерела-блока детектування m повинно бути вказане в експлуатаційній документації на конкретні радіометри.

Число вимірювань в кожному положенні джерела-блока детектування n повинно бути таким, щоб оцінка середнього квадратичного відхилення результату вимірювань, не перевищувала 0,1 межі основної похибки.

Для джерела, площа активної поверхні якого менша фіксованої площі поверхні, що контролюється:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{m} \sum \bar{\Phi}_m \quad (3)$$

$$\bar{\Phi}_m = \frac{1}{n} \sum \Phi_{m,n} \quad (4)$$

$$\Phi_0 = \frac{\varphi}{d} \quad (5)$$

де

$\bar{\Phi}$ – середнє арифметичне значення показів при m положеннях джерела в межах фіксованої площі поверхні, що контролюється.

$\bar{\Phi}_m$ – середнє арифметичне значення показів при n вимірюваннях при кожному положенні джерела в межах фіксованої площі;

$\Phi_{m,n}$ – значення n -го показу при вимірюванні положенні m ; для джерела, площа якого більша фіксованої площі поверхні, що контролюється;

φ – потік частинок з активної поверхні джерела в кут 2π ;

d – фіксована площа поверхні, що контролюється, яка вказана в ЕД на конкретні радіометри.

Для джерела, площа якого більша фіксованої площі поверхні, що контролюється:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{m} \sum \bar{\Phi}_m \quad (6)$$

$$\bar{\Phi}_m = \frac{1}{n} \sum \Phi_{m,n} \quad (7)$$

$$\Phi_0 = \frac{\varphi}{S} \quad (8)$$

де

$\bar{\Phi}$ – середнє арифметичне значення показів при m положеннях джерела в межах фіксованої площі поверхні, що контролюється.

$\bar{\Phi}_m$ – середнє арифметичне значення показів при n вимірюваннях при кожному положенні джерела в межах фіксованої площі;

$\Phi_{m,n}$ – значення n -го показу при вимірюванні положенні m ; для джерела, площа якого більша фіксованої площі поверхні, що контролюється;

φ – потік частинок з активної поверхні джерела в кут 2π ;

S – площа активної поверхні джерела.

При використанні джерел каліброваних по активності, для переходу до потоку в кут 2π , використовують коефіцієнт k .

k – коефіцієнт переходу від активності джерела альфа- або бета-випромінювання до потоку частинок у кут 2π :

для альфа- джерел типу П9: $k = 2,105; 2,085; 2,059; 2,046; 2,041; 2,039$, в залежності від площі активної поверхні джерела;

для бета- джерел типу СО: $k = 2,65$.

Схема калібрування наведена малюнку 1.

Модельне рівняння має вигляд:

$$N = \frac{\Phi_{\alpha\beta 0} \cdot k_{\lambda} \cdot k_p}{X} \quad (9)$$

де N – каліброчний коефіцієнт;

$\Phi_{\alpha\beta 0}$ – поверхнева густина потоку частинок альфа- або бета-випромінювання, $\text{см}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$;

k_p – коригуючий коефіцієнт на перехід від активності до поверхневої густини потоку частинок.

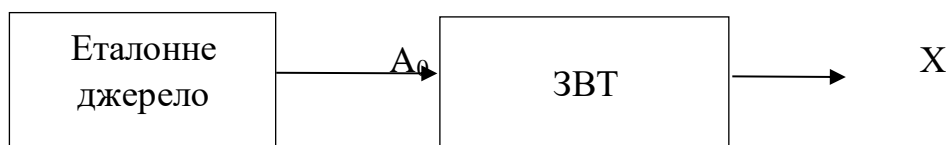
k_λ – коригуючий коефіцієнт на розпад джерела;

$$k_\lambda = \exp\left(-\frac{t}{T_{1/2}}\right) \quad (10)$$

де t – час який пройшов від калібрування еталонного джерела до калібрування ЗВТ;

$T_{1/2}$ – час напіврозпаду джерела;

X – значення фізичної величини, яке було виміряне ЗВТ, що калібрується;



Малюнок 1 – Схема калібрування ЗВТ

12 Обробка результатів вимірювань та розрахунок невизначеності ЗВТ

Модельному рівнянню (1) буде відповідати наступний вираз для сумарної стандартної невизначеності вимірювання (3) в кожній точці діапазону вимірювання ЗВТ:

$$\frac{u_c(N)}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_B(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(\bar{X})}{\bar{X}}\right)^2 + \left(\frac{u(k_\lambda)}{k_\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(k_p)}{k_p}\right)^2} \quad (11)$$

де $u(\bar{X})$ – невизначеність, що пов'язана з розсіюванням показів, спектрометра, що калібруються з урахуванням похибки квантування;

$u(k_\lambda)$ – невизначеність, що пов'язана з корегуванням на розпад джерела;

$u(A_0)$ – невизначеність робочого еталонного джерела спеціального призначення.

$u(k_p)$ – невизначеність, що пов'язана з корегування на перехід від активності до поверхневої густини потоку частинок.

Оцінювання стандартних невизначеностей вхідних величин.

Невизначеність, що пов'язана з розсіюванням показів приладу, що калібрується, розраховується за формулою:

$$\frac{u_A(\bar{X})}{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (12)$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (13)$$

де X_i – результат окремих спостережень;

\bar{X}_i – середнє значення багаторазових спостережень.

Стандартна невизначеність, що вноситься еталоном при вимірюванні:

$$\frac{u_B(A)}{A} = \frac{U_{an}}{k} \quad (14)$$

Невизначеність корегуючого коефіцієнта на розпад джерела, k_λ :

$$\frac{u_B(k_\lambda)}{k_\lambda} = \frac{\Delta_\lambda}{2\sqrt{3}} \quad (15)$$

Невизначеність корегуючого коефіцієнта на перехід від активності до поверхневої густини потоку частинок k_p :

$$\frac{u_B(k_p)}{k_p} = \frac{\Delta_p}{2\sqrt{3}} \quad (16)$$

Інтервальною оцінкою невизначеності є розширена невизначеність U

$$U = k \cdot \left(\frac{u_c(N)}{N} \right) \quad (17)$$

де k – коефіцієнт охоплення, який дорівнює 2, для довірчої ймовірності $P=0,95$.

13 Оформлення результатів калібрування

Результати калібрування ЗВТ оформляють протоколом калібрування за формулою, що приведена в додатку А і сертифікатом встановленої форми.

Бюджети невизначеності вимірювань при калібруванні спектрометрів, спектрометричних комплексів, радіометрів наведених в таблицях 12.1-12.3.

Таблиця 13.1 Вимірювання активності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Вклад невизначеності
X	X	(12)	n-1	$\frac{u(\bar{X})}{\bar{X}}$
A	A	(14)	∞	$\frac{u(A)}{A}$
k_λ	k_λ	(15)	∞	$\frac{u_B(k_\lambda)}{k_\lambda}$
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
N	(1)	(11)	k	(17)

Таблиця 13.2 Вимірювання питомої (об'ємної) активності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Вклад невизначеності
X	X	(12)	n-1	$\frac{u(\bar{X})}{\bar{X}}$
A	A	(14)	∞	$\frac{u(A)}{A}$
k_λ	k_λ	(15)	∞	$\frac{u_B(k_\lambda)}{k_\lambda}$
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
N	(1)	(11)	k	(17)

Таблиця 13.3 Вимірювання поверхневої густини потоку частинок

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Вклад невизначеності
X	X	(12)	n-1	$\frac{u(\bar{X})}{\bar{X}}$
φ	φ	(14)	∞	$\frac{u(A)}{A}$
k_λ	k_λ	(15)	∞	$\frac{u_B(k_\lambda)}{k_\lambda}$
k_p	k_p	(16)	∞	$\frac{u_B(k_p)}{k_p}$
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
N	(9)	(11)	k	(17)

Протокол калібрування №

від _____

(дата)

Замовник:

Місце калібрування:

Назва приладу:

Тип приладу:

Заводський номер:

Метод калібрування:

Допоміжне обладнання:

Умови навколишнього середовища:

- температура, °С

- вологість повітря, %

- атмосферний тиск, кПа

Зовнішній огляд:

Опробування:

Еталони:

Назва еталона	Заводський номер	Нуклід	Активність	Невизначеність	Сертифікат

Результати вимірювань:

Нуклід	Активність	№ вимірювань										Середнє значення
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Розрахунок невизначеності вимірювань:

1. Модельне рівняння:

$$N = \frac{A \cdot k_i \cdot k_p}{\bar{X}}$$

1.1 Середнє значення вимірювань питомої активності:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

1.2 Стандартна невизначеність по типу А знаходиться за формулою:

$$\frac{u_A(\bar{X})}{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

2. Розрахунок невизначеності по типу В:

Стандартна невизначеність, що вноситься еталоном при вимірюванні:

$$\frac{u_B(A)}{A} = \frac{U_{en}}{k}$$

Невизначеність корегуючого коефіцієнта на розпад джерела, k_λ :

$$\frac{u_B(k_\lambda)}{k_\lambda} = \frac{\Delta_\lambda}{2\sqrt{3}}$$

Невизначеність корегуючого коефіцієнта на перехід від активності до поверхневої густини потоку частинок k_p :

$$\frac{u_B(k_p)}{k_p} = \frac{\Delta_p}{2\sqrt{3}}$$

Інтервальною оцінкою невизначеності є розширена невизначеність U

$$U = k \cdot \left(\frac{u_c(N)}{N} \right)$$

3. Бюджет невизначеності вимірювання наведений в таблиці:

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Вклад невизначеності
X	X	(12)	n-1	$\frac{u(\bar{X})}{\bar{X}}$
A	A	(14)	∞	$\frac{u(A)}{A}$
k_λ	k_λ	(15)	∞	$\frac{u_B(k_\lambda)}{k_\lambda}$
k_p	k_p	(16)	∞	$\frac{u_B(k_p)}{k_p}$
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
N	(9)	(11)	k	(17)

Висновок _____

Зареєстроване свідоцтво про калібрування _____

Калібрування виконав _____

(підпис)

**Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються при
калібруванні**

1 Еталонні ДІВ, що використовуються для калібрування спектрометрів, спектрометричних комплексів, радіометрів наведені в таблиці Д2.1

Таблиця Д2.1

Тип	Заводський номер	Нуклід	Активність	Розширена невизначеність
Вторинний еталон ВЕТУ 12-02-01-98	№ 19465-№19490	Плутоній-239	від 20,6 Бк до 2,41x10 ⁶ Бк	U = ± 2 %; (κ=2, P = 0,99)
	19285-19463	Стронцій-90 + Ітрій-90	Активність від 23,7 Бк до 5,50 × 10 ⁷ Бк	
	Набір радіонуклідних джерел альфа-, бета- випромінювання	2576 2588	Уран-234	
ОИСН	99	Cs-137	14,2 Бк/г	U = ±7 %
ОИСН	106	K-40	5,70 Бк/г	U = ±7 %
ОИСН-1	341	Cs-137	37,8 Бк/кг	U = ±7 %
ОИСН-1	342	K-40	210 Бк/кг	U = ±7 %
ОИСН	343	Am-241	9980 Бк/кг	U = ±7 %

		Eu-152	4590 Бк/кг	
		Cs-137	2820 Бк/кг	
ОИСН-1	344	Sr-90	6790 Бк/кг	U = ±7 %
ОИСН	16	Eu-152	86100 Бк/кг	U = ±7 %
ОИСН	ОІ426	Cs-137	1280 Бк/кг	U = ±7 %
		K-40	4960 Бк/кг	
ОИСН	01-010-06	Th-232	3730 Бк/кг	U = ±7 %
ОИСН	01-011-06	Ra-226	3440 Бк/кг	U = ±7 %
КОИСН-3	242	Sr-90	55,7 Бк	U = ±7%
КОИСН-3	243	Cs-137	1580 Бк	U = ±7 %
КОИСН-3	247	Ra-226	184 Бк	U = ±7 %
КОИСН-3	249	Th-232	494 Бк	U = ±7 %
ОСГИ	13-64-17	Cs-137	291 кБк	U = ± 3 %
КИТ-1	04-795-16	Eu-152	137 кБк	U = ± 7 %
	04-794-16	Am-241	28,7 кБк	
КСПАК	ОАИ-5 №1	Sr-90+Y-90	8,20 x10 ² Бк	U = ± 7 %
	ОАИ-6 №1		1,52 x10 ⁴ Бк	
	ОАИ-6 №2		3,19 x10 ² Бк	

2 Допоміжне обладнання, що використовуються для калібрування універсальних спектрометричних комплексів, радіометрів, спектрометрів наведені в таблиці Д2.2.

Назва	Тип	Заводський номер
Гігрометр психрометричний	ВИТ-1	25
Барометр-анероїд	М-67	47
Дозиметр	ДРГ-01Т	4679
Ваги для статичного зважування	Модель 323	39910160016

Таблиця Д2.2

Допускається застосування іншого еталонного обладнання, метрологічні параметри та характеристики яких не гірші за ті, що наведені в таблицях.

ДОДАТОК 3

ПРОТОКОЛИ МІЖЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ (ЗВІРЯНЬ)

ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”
КАЛІБРУВАЛЬНА ЛАБОРАТОРІЯ

ПОГОДЖЕНО

Заступник генерального директора
з науково-метрологічної роботи
ННЦ “Інститут метрології”


О.В. Прокопов
“ 02 ” 02 20 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Перший заступник генерального директора
ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”


В.П. Кириченко
28 02 20 р.

ЗВЕДЕНИЙ ЗВІТ № IR – 01 – 20

про проведення міжлабораторних порівнянь
результатів калібрування

1. Мета: проведення міжлабораторних порівнянь результатів калібрування (МПР) для забезпечення зовнішнього контролю якості результатів калібрування згідно вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 “Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій”.

2. Калібрувальні лабораторії, що приймали участь в МПР:

- калібрувальна лабораторія ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”;
- калібрувальна лабораторія ННЦ “Інститут метрології”.

3. Об'єкт калібрування: Радіонуклідне джерело альфа-випромінювання 6П9-254 № 19489, радіонуклідне джерело бета-випромінювання типу 4СО-212 № 19581, радіонуклідне джерело спеціального призначення ОИСН № 20/378.

4. Найменування показника, який визначається:

- активність радіонуклідного джерела іонізуючого випромінювання;
- потік альфа-, бета-частинок в кут 2π радіонуклідного джерела іонізуючого випромінювання;
- питома активність радіонуклідного джерела іонізуючого випромінювання;
- невизначеність.

5. Нормативна документація:

- МК-IR-02-2020 “Джерела іонізуючого випромінювання. Методика калібрування”;
- МКУ 12-357:2016 Метрологія. Джерела радіонуклідні альфа-, бета-випромінювання. Активність. Методика калібрування;
- МКУ 12-53:2010 Метрологія. Джерела радіонуклідні спеціального призначення. Об'ємна і питома активність. Методика калібрування;
- ЗД-08.15.31. Загальний документ «Оцінка відповідності. Основні вимоги до проведення перевірки кваліфікації» (відповідно до ISO/IEC 17043:2010), затверджено наказом НААУ № 200-Я від 29.07.2015 р.

6. Еталони

Еталони, за допомогою яких виконувалося калібрування, наведені в таблиці 1

Таблиця 1 Найменування та метрологічні характеристики еталонів

ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”	ННЦ “Інститут метрології”
1	2
<u>Еталони для калібрування радіонуклідного джерела бета-випромінювання типу СО</u>	
Вторинний еталон одиниці активності альфа-, бета - випромінюючих нуклідів ВЕТУ 12-02-01-98, U=2,0 %, P=0,95, k=2	Державний еталон ДЕТУ 12-02-98, U=(1,02 - 4,2) %, P=0,95, k=2
<u>Еталони для калібрування радіонуклідного джерела бета-випромінювання типу СО</u>	
Джерело бета випромінювання типу 4СО-212 №19554, U=3,0 %, P=0,95, k=2	Державний еталон ДЕТУ 12-02-98, U=(1,02 - 4,2) %, P=0,95, k=2
<u>Еталони для калібрування радіонуклідного джерела спеціального призначення КОИСН</u>	
Радіонуклідне джерело спеціального призначення ОИСН-1 ¹³⁷ Cs № ОI426, U=7,0%, P=0,95, k=2	Державний еталон ДЕТУ 12-02-98, U=(1,02 - 4,2) %, P=0,95, k=2

7. Дата калібрування:

ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”	ННЦ “Інститут метрології”
30.01.2020	04.02.2020

8. Умови проведення калібрування:

ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”	ННЦ “Інститут метрології”
температура навколишнього середовища: 22,0 °С; відносна вологість: 62 %; атмосферний тиск: 99,1 кПа; радіаційний фон: 0,18 мкЗв/год	температура навколишнього середовища: 20,5 °С; відносна вологість: 58 %; атмосферний тиск: 100,5 кПа; радіаційний фон: 0,16 мкЗв/год

9. Результати калібрування. Результати калібрування наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 Результати калібрування

Показник калібрування	ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”	ННЦ “Інститут метрології”	Значення критерія задовільності
1	2	3	4
<u>Радіонуклідне джерело бета-випромінювання 6P9-254 № 19489</u>			
Активність	$2,52 \times 10^4$ Бк	$2,60 \times 10^4$ Бк	- 0,872
Розширена невизначеність	$U_{lab}=3,0\%$, $P=0,95$, $k=2$	$U_{ref}=2,0\%$, $P=0,95$, $k=2$	
<u>Радіонуклідне джерело бета-випромінювання 4CO-212 № 19581</u>			
Потік альфа-, бета-частинок в кут 2л	$41,3$ с ⁻¹	$42,1$ с ⁻¹	- 0,385
Розширена невизначеність	$U_{lab}=4,0\%$, $P=0,95$, $k=2$	$U_{ref}=3,0\%$, $P=0,95$, $k=2$	
<u>Радіонуклідне джерело спеціального призначення ОИСН ¹³⁷Cs № 20/378</u>			
Питома активність	545 Бк/кг	540 Бк/кг	0,081
Розширена невизначеність	$U_{lab}=9,0\%$, $P=0,95$, $k=2$	$U_{ref}=7,0\%$, $P=0,95$, $k=2$	

Значення критерія задовільності визначається за статистикою функціонування E_n :

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}},$$

де x - значення фізичної величини (ФВ), визначене Учасником (ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”);

X - дійсне значення ФВ (ННЦ “Інститут метрології”);

U_{lab} – розширена невизначеність вимірювань значення ФВ (ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”);

U_{ref} – розширена невизначеність вимірювань дійсного значення ФВ (ННЦ “Інститут метрології”).

При цьому, якщо:

$E_n \leq 1$ - результат не потребує заходів корегування або реагування;

$E_n > 1$ - результат потребує заходів корегування або реагування.

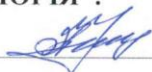
10. Висновки: за результатами аналізування міжлабораторних порівнянь калібрувальною лабораторією ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ” та калібруваль-

ною лабораторією ННЦ “Інститут метрології” значення критерія задовільності не перевищує 1,0 для кожного показника калібрування. Умови критерія задовільності виконані, що свідчить про забезпечення відповідної якості результатів калібрування.

Калібрування провели:

Від ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”:

Начальник відділу МЗВ ХІВ



А.В. Приходько

Від ННЦ “Інститут метрології”:

Директор наукового центру
квантових вимірювань



О.М. Летучий

ДОДАТОК 4



МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«КИЇВСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР
СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ»**

(ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»)

вул. Січневого прориву, 84, м. Біла Церква, Київська обл., 09113, ЄДРПОУ 02568087
тел./факс: (0456) 34-71-73,, e-mail; office@centr.bcdst.kiev.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ



Генеральний директор
ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

Ірина КРАВЧЕНКО

10 лютого 2020 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи на здобуття вченого ступеню доктора
філософії Берестовим Русланом Володимировичем
в ДЕРЖАВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ «КИЇВСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА
СЕРТИФІКАЦІЇ»**

Даним актом підтверджується, що у ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» реалізовано наступні результати дисертаційного дослідження, отримані аспірантом Національного університету «Львівська політехніка» Берестовим Русланом Володимировичем:

- розроблено методику калібрування МК-IR-01-2020 «Засоби вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності, поверхневої густини потоку частинок»;
- досліджено процедури передачі розміру одиниць альфа-, бета-, гамма-випромінювання для спектрометрів та радіометрів, що дало змогу підвищити точність калібрування.

Заступник генерального директора
з наукової роботи

ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

Л.Г. Бартків

ДОДАТОК 5

Приклад сертифіката
на еталонне устаткування
для калібрування засобів вимірювальної техніки
іонізаційного випромінювання

СЕРТИФІКАТ

Реєстраційний № KIR01033503423 <i>Reference number</i>	Дата видачі сертифіката 27 листопада 2023 року <i>Date of issue</i>
Об'єкт калібрування (назва, тип, зав.№) <i>Calibration object (name, type, serial number)</i>	Комплекс універсальний спектрометричний УСК "Гамма-Плюс U" зав. № 811-53 з блоками детектування: СБДГ-01 № 811-32, СБДБ-01 № 811-12
Назва та адреса замовника <i>Name of customer, address</i>	Сумська регіональна державна лабораторія державної служби України з питань безпеки харчових продуктів та захисту споживачів, вул. Люблінська, 17, м. Суми, 40009
Місце проведення калібрування <i>location where the calibration was carried out</i>	Сумська регіональна державна лабораторія державної служби України з питань безпеки харчових продуктів та захисту споживачів, вул. Люблінська, 17, м. Суми, 40009
Метод калібрування <i>Method of calibration</i>	МК-IR-01-2020 Засоби вимірювання активності, питомої (об'ємної) активності, поверхневої густини потoku частинок. Методика калібрування. Метод прямого вимірювання.

*Всі вимірювання мають простежуваність до одиниць Міжнародної системи SI.
Цей сертифікат калібрування може бути відтворений тільки повністю. Будь-яка
публікація або часткове відтворення змісту сертифіката можливе лише з письмової
згоди ДП "КІЇВОБЛСТАНДАРТАМЕТРОЛОГІЯ".*

*Сертифікат калібрування без підписів і печатки не дійсний. Результати стосуються
лише відкаліброваного об'єкту.*

*All measurements have traceability to the SI units. This certificate shall not be reproduced, except in full. Any publication
extracts from the calibration certificate requires written approval of the issuing SE "KYIVOBBLSTANDARTMETROLOGY".
Calibration certificate without signatures and stamp is not valid. The results relate only to the item calibrated.*

Перший заступник
генерального директора
First Deputy General Director

підпис/signature

Валерій КИРИЧЕНКО
ім'я і прізвище/name

Реєстраційний № KIR01033503423
Reference number

Дата калібрування 14 листопада 2023 року
Date when calibrated

Калібрування проведене за допомогою

Calibration was made with

Радіонуклідних джерел спеціального призначення типу: ОИСН-1 зав. № 341 (Сертифікат калібрування UA 01 № 1020 від 31.05.2023 р.), РДСП зав. № 316 (Сертифікат калібрування UA 01 № 1818 від 16.08.2022 р.), ОИСН зав. № ОІ426 (Сертифікат калібрування UA 01 № 1019 від 31.05.2023 р.), ОИСН-3 № 20/17-05 (Сертифікат калібрування UA 01 № 1811 від 16.08.2022 р.), ОИСН-1 № 344 (Сертифікат калібрування UA 01 № 1016 від 31.05.2023 р.), ОИСН № 104 (Сертифікат калібрування UA 01 № 2552 від 26.10.2023 р.)

Умови проведення калібрування

Conditions of calibration

температура повітря - 19,1°C;
атмосферний тиск - 100,3 кПа;
відносна вологість - 70 %;
радіаційний фон - 0,14 мкЗв/год.

Результати калібрування, враховуючи невизначеність, згідно протоколу калібрування № IR01033503423 від 14 листопада 2023 року

Calibration results including uncertainty

Таблиця 1. Результати калібрування, враховуючи невизначеність калібрування в кожній точці

Величина, що вимірюється	Геометрія вимірювання	Радіонуклід	Значення, що вимірювалось	Коефіцієнт калібрування, N	Розширена невизначеність калібрування, U,%
Питома активність, Бк/кг	Марінеллі 1л	¹³⁷ Cs	29,9	0,97	10
			106	0,93	10
			1010	0,87	10
	Половина Марінеллі		29,9	0,74	10
			106	1,05	10
			1010	0,98	10
	Чашка «Петрі»		29,9	0,81	10
			106	1,27	10
			1010	1,12	10
	Кювета, ø70×5 мм	⁹⁰ Sr	185	0,96	13
			5317	0,91	10
			11617	1,02	10

Реєстраційний № KIR01033503423
Reference number

Дата калібрування 14 листопада 2023 року
Date when calibrated

Таблиця 2. Результати калібрування, враховуючи невизначеність калібрування для усього діапазону калібрування

Величина, що вимірювалась	Геометрія вимірювання	Радіонуклід	Коефіцієнт калібрування, N	Розширена невизначеність калібрування, U, %
Питома активність, Бк/кг	Марінеллі, 1л	^{137}Cs	0,93	12
	Половина Марінеллі		0,92	12
	Чашка «Петрі»		1,07	16
	Кювета, $\varnothing 70 \times 5$ мм	^{90}Sr	0,96	15

Покази від контрольного джерела:

КОИСН-1 $^{137}\text{Cs} + ^{40}\text{K}$ № 01-179-18 в інтервалі від 600 кеВ до 720 кеВ становлять $21,6 \text{ c}^{-1}$

КИТ-1 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ № 04-812-18. в інтервалі 250 кеВ до 500 кеВ становлять $104,2 \text{ c}^{-1}$

Розширена невизначеність U отримана шляхом множення стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення $k=2$, який відповідає рівню довіри 95% при допущенні нормального розподілу ймовірностей. Оцінку невизначеності проведено у відповідності до рекомендацій "Керівництво по вираженню невизначеності вимірювань" (GUM).

The extended uncertainty U is obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$, which corresponds to a confidence level of 95% with the assumption of a normal probability distribution. The uncertainty assessment is conducted in accordance with the recommendations "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM).

Відповідальний виконавець,
який проводив калібрування
Person who has performed calibration

Провідний інженер
posada/function

підпис/signature

Руслан БЕРЕСТОВ

ім'я, прізвище/name

Керівник лабораторії
Head of the laboratory
прізвище/name

підпис/signature

Лариса МАЛИШ

ім'я,

Порівняльна характеристика контрольних карт

Тип карти	Назва карти	Призначення
Карта контролю за кількісною ознакою	Приймальна контрольна карта	Контрольна карта, призначена для оцінки відповідності зображуваної на карті контрольованої характеристики встановленим допускам.
Контрольна карта, що використовує дані кількох підгруп для кожного значення, що наноситься на карту	Контрольна карта регулювання процесу	Контрольна карта, що використовує модель прогнозування процесу, призначена для оцінювання і відображення на графіку прогнозованої тенденції змін процесу (у разі відсутності коригувань процесу), а також визначення величини змін, необхідних для підтримання процесу в прийнятних межах.
Контрольна карта, що використовує дані кількох підгруп для кожного значення, що наноситься на карту	Контрольна карта кумулятивних сум, КУСУМ-карта	<p>Контрольна карта, на якій відображають кумулятивну суму відхилень статистик послідовних вибірок від цільового значення для виявлення змін характеристики процесу.</p> <p>Примітка 1 - Ордината кожної нанесеної точки являє собою алгебраїчну суму ординати попередньої точки і найостаннішого відхилення від цільового або контрольованого значення.</p> <p>Примітка 2 - Найефективніше виявлення змін характеристики процесу в ситуації, коли контрольованою характеристикою є загальне середнє значення.</p> <p>Примітка 3 - КУСУМ-карту можна використовувати для контролю, діагностики та прогнозування поведінки спостережуваної характеристики.</p>

		Примітка 4 - Під час використання КУСУМ-карти для контролю її інтерпретують за допомогою накладених на неї масок (наприклад, V-маски). Сигнал виникає в тому разі, коли лінія кумулятивної суми перетинає межу маски або торкається її.
	Карта контролю за кількісною ознакою	Контрольна карта Шухарта, призначена для представлення даних, вимірюваних за безперервною шкалою.
	Карта контролю по альтернативному признаку	Контрольна карта Шухарта. призначена для представлення категоризованих даних.
Карта контролю за альтернативною ознакою	Контрольна карта числа невідповідностей, с-карта	Карта контролю за альтернативною ознакою, призначена для відображення кількості появи певних подій.
Карта контролю за альтернативною ознакою	Контрольна карта числа невідповідностей на одиницю (продукції), u-карта	Карта контролю за альтернативною ознакою, призначена для оцінки кількості випадкових подій на одиницю продукції.
Карта контролю за альтернативною ознакою	Контрольна карта числа невідповідних одиниць (продукції), np-карта	Карта контролю за альтернативною ознакою, призначена для оцінки кількості одиниць продукції даного класу за постійного обсягу вибірки.
Карта контролю за альтернативною ознакою	Контрольна карта часток або відсотка, p-карта	Карта контролю за альтернативною ознакою для оцінки частки одиниць продукції даного класу від загальної кількості одиниць продукції у вибірці, вираженої у вигляді пропорції або відсотка. Примітка 1 - У галузі якості класом зазвичай є клас "невідповідних одиниць продукції". Примітка 2 - Як правило, p-карти застосовують у тих випадках, коли обсяг вибірки є непостійним.

		Примітка 3 - Дані на p-карту можуть бути нанесені у вигляді частки або відсотка.
Карта контролю за кількісною ознакою	Контрольна карта середніх арифметичних. \bar{X} -карта	Карта контролю за кількісною ознакою, призначена для оцінки мінливості процесу на основі середніх арифметичних у підгрупах.
Карта контролю за кількісною ознакою	Контрольна карта медіан	Карта контролю за кількісною ознакою, призначена для оцінки мінливості процесу на основі значень медіан у підгрупах.
Карта контролю за кількісною ознакою	Контрольна карта ковзних середніх	<p>Контрольна карта, призначена для оцінки стану процесу за середніми арифметичними останніх n спостережень.</p> <p>Примітка 1 - Така карта особливо корисна, коли доступне тільки одне спостереження в підгрупі.</p> <p>Приклади - характеристики якості процесу, такі як температура, тиск, час.</p> <p>Примітка 2 - Нове спостереження замінює останнє з наявних ($n + 1$) спостережень.</p> <p>Примітка 3 - Недоліком карти є відсутність вагових коефіцієнтів під час обчислення середнього арифметичного, що враховують склад використовуваних n точок.</p>
Карта контролю за кількісною ознакою	Контрольна карта індивідуальних значень. X -карта	<p>Карта контролю за кількісною ознакою, призначена для оцінки мінливості процесу на основі індивідуальних спостережень у вибірці.</p> <p>Примітка 1 - Цю контрольну карту зазвичай застосовують разом із контрольною картою ковзних розмахів із $n = 2$.</p> <p>Примітка 2 - X-карта не використовує переваги усереднення, що дає змогу використовувати нормальний розподіл відповідно до центральної граничної теореми.</p>

		<p>Примітка 3 - Індивідуальні значення зазвичай позначають x_1, x_2, x_3, \dots. Іноді замість x використовують позначення y.</p> <p>Примітка 4 - При використанні цієї карти зазвичай символом R позначають ковзний розмах, який являє собою абсолютне значення різниці двох послідовних значень.</p>
Контрольна карта, що використовує дані кількох підгруп для кожного значення, що наноситься на карту	Контрольна карта експоненційно зважених ковзних середніх, EWMA-карта	Контрольна карта, призначена для оцінки мінливості процесу за експоненційно згладженими ковзними середніми арифметичними значеннями.
Контрольна карта, що використовують дані кількох підгруп для кожного значення, що наноситься на карту	Контрольна карта з трендом	<p>Контрольна карта, призначена для оцінювання мінливості процесу на основі відхилень середніх арифметичних за підгрупами від очікуваного тренда рівня процесу.</p> <p>Примітка 1 - Тренд може бути визначений експериментально або методами регресійного аналізу.</p> <p>Примітка 2 - Тренд - це тенденція зміни центральної лінії процесу після виключення випадкових змін і циклічних впливів, якщо спостережувані значення подано на графіку в порядку, що відповідає часу спостережень.</p>
Карта контролю за кількісною ознакою	Контрольна карта розмахів. R-карта	<p>Карта контролю за кількісною ознакою, призначена для оцінки мінливості процесу за розмахами в підгрупах.</p> <p>Примітка 1 - Значення розмаху в підгрупі R являє собою різницю найбільшого і найменшого спостережень у підгрупі.</p> <p>Примітка 2 - Середнє арифметичне розмахів для всіх підгруп позначають символом \bar{R}.</p>

Карта контролю за кількісною ознакою	Контрольна карта стандартних відхилень, s-карта	Карта контролю за кількісною ознакою, призначена для оцінки мінливості процесу за вибірковими стандартними відхиленнями в підгрупах.
Контрольна карта, що використовує дані кількох підгруп для кожного значення, що наноситься на карту	Контрольна карта ковзних розмахів	Карта контролю за кількісною ознакою, призначена для оцінки мінливості процесу за розмахом послідовних n спостережень. Примітка - Нове спостереження замінює найстаріше з $(n + 1)$ останніх спостережень.
Карта контролю за кількісною ознакою	Багатовимірна контрольна карта	Контрольна карта, призначена для оцінювання мінливості процесу на основі даних єдиної вибіркової статистики двох або більшої кількості корельованих змінних для кожної підгрупи.
Карта контролю за комплексною ознакою	Контрольна карта багатовимірної характеристики	Карта контролю за альтернативною ознакою для оцінки мінливості процесу на основі більш ніж однієї характеристики якості.
Карта контролю за експертною оцінкою	Контрольна карта балів якості	Контрольна карта багатовимірної характеристики, призначена для оцінки процесу на основі присвоєння вагових коефіцієнтів подіям залежно від їхньої значущості.