

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

ЛАЗАРЕНКО СЕРГІЙ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 621.396.08

**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК
ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕТАЛОННОЇ
БАЗИ ПІД ВИМОГИ ЄС**

05.01.02 - стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

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

Сергій Лазаренко

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –

Доктор технічних наук, професор

Святослав Яцишин

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар разової спеціалізованої

вченої ради

Оксана ГОНСЬОР

Львів - 2023

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Реалізація Програми інтеграції України в Європейський Союз вимагає гармонізації стандартів, зокрема в галузі метрологічного забезпечення вимірювання характеристик іонізуючого випромінювання. Нещодавно у світі з'явилося чимало нормативних-технічних, методичних документів та інших матеріалів, що відносяться до сфери дозиметричних вимірювань, променевої діагностики і терапії, тощо. Незважаючи на сталий розвиток ядерної енергетики й приладобудування, заміна й модернізація еталонного обладнання для метрологічного забезпечення засобів виміральної техніки іонізуючих випромінень відбувається недостатньо інтенсивно. Гостро стоїть питання щодо характеристик та точності еталонів, якими забезпечені метрологічні лабораторії, щодо умов і методів створення стандартного джерела випромінювання для метрологічної перевірки чи калібрування ЗВТ. Особливо важка ситуація складається з еталонним устаткуванням для дозиметрії гамма-випромінювання. Таким чином, обґрунтування постановки науково-технічної роботи стосовно розвитку метрологічного забезпечення галузі стає очевидною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до планів наукової діяльності кафедри «Інформаційно-вимірвальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» - теоретичні та прикладні основи метрології і вимірювань в інформаційних технологіях (інформаційно-вимірвальних, кібер-фізичних, робототехнічних та інших системах); тестування якості продукції і програмного забезпечення - та Державного підприємства «Київський обласний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації» в рамках науково-дослідної тем, яке використало результати при калібруванні дозиметричних устаткування, дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз для відокремлених підрозділів ДП НАЕК «Енергоатом», державних метрологічних центрів та інших підприємств. Для цього розроблено методики калібрування: МК-IR-03-2020 «Дозиметри, вимірювачі потужності дози гамма- та рентгенівського випромінювання»; МК-IR-04-2020 «Устаткування рентгенівського випромінювання,

дозиметричні устаткування та радіонуклідні джерела гамма-випромінення”; досліджено процедури передачі розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних установок колімованої геометрії типу УПГД-2 та для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами типу УПД-ІНТЕР.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є аналіз стану метрологічного забезпечення вимірювань характеристик рентгенівського та гамма - випромінювання в області дозиметричних вимірювань та пошук методів удосконалення еталонної бази в Україні та подальшого розвиток методів і засобів метрологічного забезпечення галузі.

Для реалізації окресленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз вітчизняних нормативних документів в області іонізуючого випромінювання (дозиметричних вимірювань) та вивчити зарубіжний досвід;
- вивчити стан еталонної бази України в області дозиметричних вимірювань;
- вивчити та провести аналіз характеристик випромінення та методів їх створення;
- вивчити та провести аналіз процедур калібрування дозиметрів та вимірювачів потужності дози;
- дослідити процедури передачі розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних установок колімованої геометрії типу УПГД-2 та для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами типу УПД-ІНТЕР;
- дослідити можливості калібрування дозиметрів гамма-випромінювання з використанням рентгенівської устаткування;
- розробити методику калібрування дозиметрів та вимірювачів потужності дози рентгенівського та гамма-випромінювання;
- розробити методику калібрування устаткування рентгенівського випромінення, дозиметричних устаткування та радіонуклідних джерел гамма-випромінення.

Об’єкт дослідження - рентгенівські та гамма-устаткування еталонні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів.

Предмет дослідження – характеристики випромінення, методи їх створення, засоби калібрування дозиметрів та вимірювачів потужності дози.

Методи дослідження. У дисертації використано теоретичні аспекти інформаційно-виміральної техніки та метрології, моделювання, програмування, розроблення, дослідження та стандартизації, в тому числі у галузі метрологічного забезпечення засобів виміральної техніки, включаючи радіометри та інші види ЗВТ. Експерименти проводились за допомогою засобів еталонної радіометрії; у дослідженнях використано низку унікальних устаткування еталонної бази України, включаючи еталонні джерела випромінювання, релевантні устаткування для передачі розміру одиниці еталону та безпосередньо низку партій ЗВТ, що підлягали калібруванню.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні та оптимізації метрологічного забезпечення технології передавання до кінцевого споживача розміру одиниць іонізуючого випромінювання Національної еталонної бази шляхом її модернізації під вимоги стандартів Європейського Союзу.

У дисертаційній роботі отримано наступні наукові результати:

1. На основі вивчення чинної в ЄС та в Україні нормативної та нормативно технічної документації, що стосуються забезпечення єдності вимірювань у галузі дозиметрії встановлено, що Схема передавання розміру одиниці, яка включає високовартісні джерела випромінювання (Національні еталони), спеціалізоване устаткування з вторинними та робочими еталонами, що передають розмір одиниці до дозиметрів і вимірювачів потужності доз, вимагає модернізації під Європейські стандарти.
2. Доведено дослідженнями, що за існуючих в Україні з 70-х років минулого століття еталонних джерел випромінювання та установок, вимоги Європейського Союзу до точності передавання розміру одиниці та її непевності можуть бути досягнуті завдяки подальшому відпрацюванню методології, розвитку методів, вивченню і вдосконаленню еталонного устаткування рентгенівського і гамма-випромінювання, для чого визначено об'єкти досліджень - стандартні характеристики рентгенівського та гамма-випромінювання, розвинуто методи моделювання і процедури калібрування.
3. На основі досліджень **вперше** доведено, що еталонне устаткування України колімованого типу може ефективно використовуватись у метрологічному

забезпеченні галузі для калібрування (повірки) і випробувань дозиметрів, причому міжлабораторні випробування підтвердили відповідність вимогам стандартів ЄС, тоді як аналогічні дослідження устаткування неколімованого типу показали, що дані операції вимагають попереднього уточнення рівномірності поля, типу й кількості дозиметрів та їх місцезнаходження в зоні опромінення, оскільки характеристики, розраховані за відомими законами розподілу інтенсивності, накладаючись на реальні конфігурації, підлягають спотворенню.

4. Для досягнення необхідної точності передавання розміру одиниці удосконалено методику калібрування еталонного устаткування, причому для устаткування колімованого типу це реалізується прямим методом за допомогою еталонного дозиметра і непрямим методом за допомогою компаратора, функції якого виконує високоточний (1,5%-3%) дозиметр з декількома іонізаційними камерами, а для устаткування неколімованого типу подібне досягається прямим методом за допомогою еталонного дозиметра, виключно для енергетично скомпенсованих дозиметрів, і непрямим методом за допомогою групового компаратора вперше в Україні, що дає змогу підвищити точність калібрування дозиметрів вдвічі.

5. На основі аналізу непевності характеристик відкаліброваних дозиметрів, оптимізовано тривалість їх калібрування, що дає змогу в динамічному режимі зменшити тривалість циклу випробувань та розмір вибірки на 28 %, а також доведено можливості калібрування (повірки) дозиметрів гамма-випромінювання з використанням рентгенівської установки.

Практичне застосування отриманих результатів. Результати досліджень використано для калібрування дозиметрів, вимірювачів доз, еталонного дозиметричного устаткування колімованої та неколімованої форми. Це дає змогу підвищити точність калібрування (зменшити невизначеність) засобів вимірювальної техніки та обладнання.

Державне підприємство «Київоблстандартметрологія» використало результати при проведенні калібрування дозиметричних устаткування, дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз для відокремлених підрозділів

ДП НАЕК «Енергоатом», державних метрологічних центрів та інших підприємств. Зокрема, розроблено методики калібрування МК-IR-03-2020 «Дозиметри, вимірювачі потужності дози гамма- та рентгенівського випромінення»; МК-IR-04-2020 «Устаткування рентгенівського випромінення, дозиметричні устаткування та радіонуклідні джерела гамма-випромінення»; досліджено процедури передачі розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних установках колімованої геометрії типу УПГД-2 та для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами типу УПД-ІНТЕР, що дало змогу підвищити точність калібрування як самих устаткування, так і дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз.

Крім того, результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри «Інформаційні вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», в тому числі аспірантів - дисциплін «Вибрані питання опрацювання результатів вимірювань та вимірювальних сигналів», «Проблеми технічного регулювання та оцінювання відповідності».

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто сформовано постановку задачі з вивчення можливості впровадження Європейських стандартів у галузі, досліджено елементи забезпечення метрологічної надійності при передаванні розміру еталонної одиниці, вивчено засобів метрологічного забезпечення при калібруванні промислових дозиметрів, уточнено методологію калібрування засобів вимірювальної техніки, розроблено методологію оцінювання метрологічних ризиків при калібруванні, дослідження особливості впровадження устаткування калібрування на основі рентгенівських устаткування.

Апробація результатів. Викладені у роботі положення та результати досліджень 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-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; Міжнародній конференції метрологів МЦМ’2019 10-12 вересня 2019 року, Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів; 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; Регіональній конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення», 3-4 грудня 2020 року, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів.

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 150 сторінок, з яких 108 сторінок основного тексту, що містять 31 формулу, 14 рисунків та 19 таблиць. Список використаних джерел налічує 101 найменувань.

Публікації: За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 7 наукових праць, з них 5 статей у фахових виданнях України, 1 стаття – у науковому періодичному виданні іншої держави, що включене до міжнародної наукометричної бази даних, 1 розділ у закордонній колективній монографії, 5 тез доповідей.

Метрологічне забезпечення вимірювань характеристик іонізуючого випромінення та модернізація еталонної бази під вимоги ЄС

АНОТАЦІЯ

Лазаренко С.Л., Метрологічне забезпечення вимірювань характеристик іонізуючого випромінення та модернізація еталонної бази під вимоги ЄС. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти та науки України, Львів, 2023.

Дисертація присвячена дослідженню та вирішенню проблем метрологічного забезпечення вимірювань характеристик іонізуючого випромінювання та модернізації еталонної бази України під вимоги Європейського Союзу.

У першому розділі розглянуто чинні аспекти розвитку методів і засобів метрологічного забезпечення засобів вимірювань іонізуючих випромінювань.

Під час розпаду ядер радіоактивних речовин виділяються: α, β -частинки та γ -промені. Зокрема, розглянуто основні поняття та дозиметричні величини радіометрії, до яких відносяться період напіврозпаду й активність радіоактивної речовини. Проходження рентгенівських (γ) променів, а також (α, β -частинок) крізь речовину супроводжується іонізацією атомів цієї речовини. Під час іонізації випромінювання втрачає частину своєї енергії, тобто відбувається поглинання речовиною енергії випромінювання. Ці явища покладені в основу роботи лічильників іонізуючих випромінювань, а також в основу роботи еталонів випромінювань, які використовуються у схемі передавання розміру одиниці випромінювання від згаданого еталону через робочий еталон до ЗВТ. Оскільки це - відпрацьована методологія, то надалі у розділі розглядаються методологія метрологічного забезпечення засобів вимірювань іонізуючих випромінювання, а саме чинна нормативна документація, як України, так і ЄС. При цьому, як засоби виміральної техніки аналізуються і оцінюються за метрологічними характеристиками саме найбільш використовувані в Україні дозиметричні засоби виміральної техніки. Останні поступають на калібрування (перевірку) згідно встановленого графіку у спеціалізовану лабораторію ДП «Київоблстандартметрологія». Технічний регламент передбачає ті чи інші види перевірок стосовно тих чи інших видів дозиметричних засобів, на які за результатами перевірки видаються Сертифікати та паспорти конкретних зразків із зазначенням метрологічних характеристик. При цьому, немаловажне значення у забезпеченні вимірювань дозиметричних величин приділяється еталонам інтенсивності (дози опромінювання). У даному випадку ДП «Київоблстандартметрологія» отримує і користується робочим еталоном, який, у свою чергу, калібрується за Державним еталоном, що зберігається у Національному науковому центрі «Інститут метрології», м. Харків.

Загальна схема передачі розміру одиниці випромінення показана у Додатку 4. У *другому розділі* вивчено методологію вимірювань характеристик дозиметричних величин, методи і засоби їх створення .

Детально розглядаються стандартні характеристики рентгенівського та гамма-випромінювання, які істотно залежать при перенесенні розміру одиниці - від еталону до конкретного ЗВТ (до конкретної партії ЗВТ) – від конструктивних особливостей устаткування калібрування, від розміщення каліброваних ЗВТ у зоні опромінення та від низки робочих параметрів і чинників впливу.

Тому у даному розділі послідовно розглядаються методи створення (формування) стандартних характеристик рентгенівського та гамма-випромінювання, адже саме від них залежить точність передавання розміру одиниці випромінення. Оскільки калібровані ЗВТ у різних партіях можуть перекривати області застосування, що істотно відрізняються, то і методи формування стандартних характеристик випромінювання та устаткування, що їх реалізують, є різними. Зокрема, у даній дисертаційній роботі у спеціалізованій лабораторії ДП «Київоблстандартметрологія» експлуатуються три устаткування для передаванні розміру одиниці випромінювання. Детально аналізуються, за результатами попередніх досліджень, наявні процедури калібрування засобів вимірювальної техніки рентгенівського та гамма- випромінювання. Результати аналізу сприяють їх вдосконаленню та покращенню метрологічних параметрів калібрування ЗВТ.

На цій основі розглянуто методику калібрування дозиметрів та вимірювачів потужності дози гамма- та рентгенівського випромінювання.

У *третьому розділі* акцентується на питаннях дослідження еталонів дозиметричних одиниць іонізуючого випромінення: вони гарантують метрологічну надійність передавання розміру одиниці випромінювання.

При цьому, окремо оцінюються еталонні устаткування колімованої та неколімованої геометрії. Насамперед, обговорюються особливості передавання розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних устаткування колімованої геометрії. Тут особливо важливою є, як показали проведені дослідження, місцезнаходження каліброваних ЗВТ у просторі опромінення.

Виділено зону, у межах якої просторовий імпакт-фактор є мінімальним. Подібним чином оцінено наявність і значення факторів впливу при передаванні розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами, які відносяться до устаткування неколімованої геометрії. Відзначу, що така складна технічно і організаційно робота, що базується на оптимізації дози опромінення операторів, практично проведена в Україні вперше. Разом з тим, одночасно оцінювалась спроможність зазначених устаткування забезпечити відтворення спеціальних вимог стандартів ЄС при калібрування спеціальних ЗВТ. Як результат, їх придатність підтверджена результатами випробувань та звірки.

У четвертому розділі розглянуто аспекти прикладного впровадження методів і засобів метрологічного забезпечення дозиметричних вимірювань характеристик іонізуючого випромінювання.

На основі досвіду попередньої експлуатації та здійснення модернізації еталонних устаткування рентгенівського та гамма-випромінювання вивчаються особливості використання вищевказаних устаткування. Розробляються і вдосконалюються методики калібрування дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз опромінення, як останній етап передавання розміру одиниці. Не менша увага приділяється розробленню методики калібрування дозиметричних еталонних устаткування (1-й етап передавання розміру одиниці в умовах ДП «Київстандартметрологія»). Немаловажним для роботи останньої є опрацювання результатів вимірювань, яке вже тривалий час у ЄС проводиться відповідно до EA-4/02 M, а у Україні – Керівництва з виразу невизначеності вимірювань. Воно успішно реалізоване в п.4.4 - Оптимізація процедури розрахунку непевності під час проведення калібрування дозиметричних засобів вимірювальної техніки та еталонних устаткування.

Ключові слова: засоби вимірювальної техніки, метрологічні характеристики, калібрування, передавання розміру одиниці, метрологічне забезпечення, еталон випромінювання, дозиметричні засоби, устаткування коліматорного типу для калібрування, непевність вимірювання.

ABSTRACT

Lazarenko S.L., Metrological support of measurements of ionizing radiation characteristics and modernization of the reference base for EU requirements - Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 "Metrology and Information-Measuring Technics" - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2023.

The dissertation is devoted to the study and solution of metrological support problems for measurements of ionizing radiation characteristics and the reference base modernization of Ukraine to the requirements of European Union.

The first chapter considers the current aspects of the development of methods and means of metrological support for ionizing radiation measuring instruments.

During the decay of radioactive nuclei, α , β -particles and γ -rays are released. In particular, the basic concepts and dosimetric quantities of radiometry, which include the half-life and activity of a radioactive substance, are discussed. Passing X-rays and particles through a substance is accompanied by the ionization of its atoms. While ionization, the radiation loses energy, since the substance absorbs the radiation. These phenomena are the basis for the operation of ionizing radiation-meters, as well as the basis for the operation of radiation standards. The last are applied in the scheme for transferring the size of a radiation unit from the mentioned standard through the working standard to the measuring instrument. Since this is a well-established methodology, the section further considers the methodology of metrological support of ionizing radiation measuring instruments, namely the current regulatory documentation of both Ukraine and the EU. At the same time, the most commonly used dosimetric measuring instruments in Ukraine are analyzed and evaluated concerning their metrological characteristics. The latter are submitted for calibration (verification) according to the established schedule to the specialized laboratory of the State Enterprise "Kyivoblstandardmetrology". The Technical Regulation provides for particular types of inspections for certain types of dosimetric devices, for which certificates and passports of specific samples with metrological characteristics are issued based on the results of the inspection. Simultaneously, intensity standards

(radiation dose) are of great importance in ensuring measurements of dosimetric quantities. So, the SE “Kyivoblstandardmetrology” operates with a working standard, which, in turn, is calibrated against the State Standard stored at the National Scientific Center "Institute of Metrology", Kharkiv.

The second chapter examines the methodology for measuring the characteristics of dosimetric quantities, methods and means.

The standard characteristics of X-ray and gamma radiation are considered in detail, which significantly depend on the design of the calibration equipment, the location of the calibrated radiation sources in the exposure area, and a number of operating parameters and influence factors when transferring the unit size from the standard to a specific radiation source (to a specific batch of radiation sources).

Therefore, this section consecutively considers the methods of creating standard characteristics of X-ray and gamma radiation, since the accuracy of radiation unit size transmission depends on them. As calibrated radiation measuring instruments in different batches may overlap significantly different application areas, the methods for generating standard radiation characteristics and the equipment that implements them are different. In particular, 3 radiation unit size transfer kinds of equipment are operated in a specialized laboratory of the SE "Kyivoblstandardmetrology". Based on the results of previous studies, the existing calibration procedures for X-ray and gamma radiation measuring equipment are analyzed in detail. The results of the analysis contribute to their improvement and enhancement of metrological parameters of measuring instruments calibration. On this basis, the methodology for calibration of dosimeters and dose rate meters for gamma and X-ray radiation is enhanced.

The third chapter focuses on the study of standards for dosimetric units of ionizing radiation: they guarantee the metrological reliability of the transmission of the radiation unit size. The reference equipment of collimated and non-collimated geometry is evaluated separately. First, it is discussed the peculiarities of gamma radiation unit size transfer for reference equipment of collimated geometry. The location of the calibrated meters in the irradiation space is particularly important, as it was shown by the studies. The zone within which the spatial impact factor is minimal is identified. Similarly, the presence and values of the factors of influence on the transfer of the size of gamma

radiation units for reference equipment with lead attenuators, which are related to equipment of non-collimated geometry, are evaluated. Such a technically and organizationally complex work based on optimization of the radiation dose to operators was carried out in Ukraine firstly. The ability of the mentioned equipment to reproduce the special requirements of EU standards during calibration by special radiation sources was simultaneously assessed. So, their suitability was confirmed by the results of testing and verification.

The fourth chapter considers aspects of the applied implementation of methods and means of metrological support for dosimetric measurements of ionizing radiation characteristics. Based on the experience of previous operation and modernization of reference X-ray and gamma radiation equipment, the peculiarities of using the above equipment are studied. Methods for calibration of ionization radiation dosimeters and radiation dose meters are being developed and improved as the last stage of unit size transfer. Attention is also paid to the development of the methodology for calibration of dosimetric reference equipment (1st stage of unit size transfer in the conditions of the SE "Kyivstandardmetrology"). The processing of measurement results, which has been carried out for a long time in the EU in accordance with EA-4/02 M, and in Ukraine - the Guidelines for the Expression of Measurement Uncertainty, is important for the latter. It has been successfully implemented in Section 4.4 - Optimization of the procedure for calculating uncertainty during calibration of dosimetric measuring instruments and reference equipment.

Keywords: measuring instruments, metrological characteristics, calibration, unit size transfer, metrological support, radiation standard, dosimetric instruments, collimator-type equipment for calibration, uncertainty.

СПИСОК ПРАЦЬ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. S. Yatsyshyn, S. Lazarenko, DEVELOPMENT OF THE DOSIMETRIC STANDARDS BASE, Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», том 80, випуск 1, 2019, сс. 46-50. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.046>, <https://science.lpnu.ua/istcmtm/all-volumes-and-issues/volume-80-no1-2019/development-dosimetric-standards-base>.
Особистий внесок - Автором проаналізовано та оцінено шляхи розвитку дозиметричних досліджень в Україні у контексті змін законодавства ЄС.
2. S. Yatsyshyn, S. Lazarenko, N. Lazarenko, METROLOGICAL SUPPORT OF GAMMA - RAY MEASUREMENTS IN UKRAINE”, Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», том 81, випуск 2, 2020, С. 25-29. DOI: https://doi.org/10.23939/istcmtm_2020.02.025, <https://science.lpnu.ua/istcmtm/all-volumes-and-issues/volume-81-no2-2020>.
Особистий внесок - Автором запропонована і розвинута система метрологічного забезпечення ЗВТ у галузі вимірювань параметрів радіоактивності у тому числі завдяки впровадженню і покращенню еталонного устаткування.
3. С. Яцишин, С. Лазаренко, Н. Лазаренко, “КАЛІБРУВАННЯ ДОЗИМЕТРИЧНИХ ЗАСОБІВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ”, Метрологія та прилади, №4 (84), 2020, С. 40-43. [https://doi.org/10.33955/2307-2180\(3\)2020.40-43](https://doi.org/10.33955/2307-2180(3)2020.40-43), <https://nure.ua/branch/naukovij-zhurnal-metrologija-ta-priladi/arhiv-nomeriv/2020-rik>.
Особистий внесок - Автором досліджено особливості вимірювань параметрів радіоактивності, проведено калібрування ЗВТ та розвинуто засоби метрологічного забезпечення у галузі (еталонне устаткування).
4. Розділ у закордонній колективній монографії, М. Мукуічук, S. Lazarenko, “Studies of Metrological Characteristics of Measuring Instruments”, in Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0, IFSA Publishing, L., 2021, С. 283-325. https://www.sensorsportal.com/HTML/BOOKSTORE/Cyber-Physical_Systems_and_Metrology_4_0.htm. Автором досліджено аспекти використання поняття

непевність (uncertainty) стосовно ЗВТ у галузі вимірювань параметрів радіоактивності у тому числі еталонних об'єктах, що сприяло кращому опрацюванню результатів роботи в цілому.

5. М. Муkyichuk, N. Lazarenko, S. Lazarenko, A. Riznyk, DEVELOPMENT OF SYSTEM OF PROVIDING METROLOGICAL RELIABILITY OF MEASURING INSTRUMENTS, Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», том 80, випуск 3, 2019, сс. 53-57, DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.053>, <https://science.lpnu.ua/istcmtm/all-volumes-and-issues/volume-80-no3-2019>.

Особистий внесок - Автором запропонована і розвинута система оцінювання метрологічної надійності засобів вимірювання, в т. ч. акцептованих і пропонуванних ЄС.

6. S. Yatsyshyn, R. Baitsar, S. Lazarenko, N. Lazarenko, R. Mastylo, "METROLOGICAL RISKS AND STATE OF THE MONITORED OBJECTS", Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», Volume 83, Iss.1, 2022; pp.17-23, <https://doi.org/10.23939/istcmtm2022.01.017>, <https://science.lpnu.ua/istcmtm/all-volumes-and-issues/volume-83-no1-2022/metrological-risks-and-state-monitored-objects>.

Особистий внесок - Автором розвинута система оцінювання якості ЗВТ та інших виробів за критеріями метрологічних ризиків, що вносяться розробниками, калібруванням та які несуть користувачів перевірюваного обладнання, що дало можливість удосконалити методику калібрування.

7. K. Przystupa, Z. Kolodiy, S. Yatsyshyn, J. Majewski, Y. Khoma, I. Petrovska, S. Lasarenko, T. Hut, "STANDARD DEVIATION IN THE SIMULATION OF STATISTICAL MEASUREMENTS", METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS, Vol. 30 (2023), No. 1, <https://doi.org/10.24425/mms.2023.144403>

Особистий внесок - Автором досліджено аспекти використання поняття непевність (uncertainty) стосовно ЗВТ, уточнено результати експериментальних досліджень на спеціальних об'єктах, що сприяло формулюванню наукової новизни.

Зміст

Перелік умовних позначень.....	18
Анотація.....	19
Вступ.....	20
Розділ 1. Метрологічне забезпечення засобів вимірювань іонізуючих випромінювань.....	22
1.1. Основні поняття та дозиметричні величини.....	22
1.2. Проблеми безпеки при використанні джерел іонізуючих випромінювань	26
1.3. Метрологічні ризики виготовлення, калібрування і експлуатації елементів конструкції засобів вимірювальної техніки.....	29
1.4. Нормативна документація метрологічного забезпечення засобів вимірювань іонізуючих випромінювань, засоби та еталони.....	35
Висновки до розділу 1.....	38
Розділ 2. Методологія вимірювань характеристик дозиметричних величин, методи і засоби їх створення	40
2.1 Стандартні характеристики рентгенівського та гамма- випромінювання..	40
2.2 Методи створення (формування) стандартних характеристик рентгенівського та гамма- випромінювання.....	43
2.3 Процедури калібрування засобів вимірювальної техніки рентгенівського та гамма- випромінювання.....	47
2.4. Методика калібрування. Дозиметри, вимірювачі потужності дози гамма- та рентгенівського випромінювання.....	54
Висновки до розділу 2.....	62
Розділ 3. Дослідження еталонів дозиметричних одиниць іонізуючого випромінювання	63
3.1. Вивчення правил та стратегії формування вибірки каліброваних засобів, а також видів вибірок.....	63
3.2. Особливості передавання розміру одиниць гамма- випромінювання для еталонних устаткування колімованої\неколімованої геометрії.....	69

3.3. Забезпечення функціонування робочих еталонів інтенсивності іонізуючого випромінювання.....	80
Висновки до розділу 3.....	83
Розділ 4. Впровадження методів і засобів метрологічного забезпечення дозиметричних вимірювань характеристик іонізуючого випромінювання.....	85
4.1 Модернізація еталонних устаткування рентгенівського та гамма-випромінювання та уточнення методики їх калібрування.....	85
4.2 Оптимізація процедури розрахунку непевності під час проведення калібрування дозиметричних засобів вимірювальної техніки та еталонного устаткування.....	95
4.3. Калібрування дозиметричних засобів вимірювальної техніки.....	101
Висновки до розділу 4.....	109
Висновки	111
Список використаної літератури	114
Додатки	115
Додаток 1. Методика калібрування устаткування рентгенівського випромінювання, дозиметричні устаткування та радіонуклідні джерела гамма-випромінювання.....	115
Додаток 2. Перелік зареєстрованих даних.....	142
Додаток 3. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	145
Додаток 4. Приклад свідоцтва на еталонне устаткування для калібрування засобів вимірювальної техніки іонізаційного випромінювання.....	147

Перелік умовних позначень

ЗВТ – засоби вимірювальної техніки

ДІВ – джерела іонізуючого випромінювання

АЕС – атомна електростанція

ІВ – іонізуюче випромінювання

НД – нормативна документація

СКВ – середньоквадратичне відхилення (результатів вимірювання)

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

МХ – метрологічна характеристика

ЕД - експлуатаційна документація

ДП – державне підприємство

АНОТАЦІЯ

У зв'язку з розвитком атомної енергетики, медицини, екології та ряду інших областей науки і техніки, де використовуються джерела іонізуючого випромінювання, країни Європейського Союзу і Україна, як країна-претендент, активно розвиваються сферу метрології у цій галузі. Наявність значної кількості типів дозиметричних засобів вимірювальної техніки, у тому числі засобів, що виробляються в Україні, вимагаються розвитку методів і засобів метрологічного забезпечення цієї продукції на місці. В Україні провідною організацією вважається ДП «Київстандартметрологія», на обладнанні спеціалізованої лабораторії якого виконано дану дисертаційну роботу.

Дана робота вимагає створення і дотримання спеціальних умов і водночас згідно умов вступу України до ЄС повинна відповідати міжнародним і Європейським вимогам у сфері стандартизації. Дотримання цих вимог закладається на рівні розроблення ЗВТ, метрологічної перевірки, калібрування, тощо і забезпечується організаційним чином на етапі акредитації лабораторії, в тому числі за результатами надання послуг з перевірки та калібрування ЗВТ ДСТУ ISO/IEC Guide 60 : 2007. Оцінювання відповідності. Кодекс ustalеної практики, 2008. Дисертаційна робота повною мірою відображає спектр виконуваних, при цьому, досліджень, розробок, удосконалень та ін.

ВСТУП

З прийняттям 1 січня 2016 року Закону від 05.06.2014 № 1314-VII «Про метрологію та метрологічну діяльність» [12] в новому ракурсі постало поняття калібрування, а з 2018 року згідно [10], за яким суттєва увага приділяється поняттю «непевність вимірювань». Нормативні посилання, що стосуються імплементації останнього міжнародною організацією ІЛАС, причетною до акредитації, в тому числі в Україні лабораторій, Інакше, вказані аспекти регламентують процедури калібрувань, включаючи еталонне устаткування прикладної радіометрії, актуальне для дозиметричних ЗВТ.

Програми інтеграції України в Європейський Союз базуються на імплементації Європейських стандартів, на гармонізації їх з національними стандартами. У даній дисертаційній роботі, звісно, обговорюється згадана імплементація в галузі забезпечення єдності вимірювань щодо іонізуючого випромінювання. Сюди відносяться дозиметричні вимірювання характеристик фотонного випромінювання, актуальних для радіаційної безпеки, охорони здоров'я, променевої діагностики та терапії, тощо.

Метрологічне забезпечення вимірювань у сфері ядерної енергетики, медицини та низки інших галузей, де використовують іонізаційні випромінювання, створює свої складнощі для інтенсивного розвитку економіки України. Якщо проблеми з випуском засобів вимірювальної техніки ще можна легше вирішити, то організація метрологічного забезпечення у галузі вимагає складної науково-технічної організації, підготовлених кадрів науковців та інженерів, спроможних розвивати і експлуатувати унікальну техніку, покладаючись на чинні стандарти та посилено розвиваючи нові у відповідь на виклики сучасності, а також адаптувати їх зміни законодавства на всіх рівнях.

Існують певні проблеми, що стосуються якості еталонного устаткування для потреб дозиметрії гамма-випромінювання, як частини фотонного випромінювання. Особливо ці проблеми посилюються для еталонних і інших джерел випромінювання, що характеризуються значною активністю при високій ціні на імпортне еталонне устаткування.

Так, для реалізації викладеного у межах даної дисертаційної роботи щодо метрологічного забезпечення ЗВТ ІВ, необхідним є:

- здійснення аналізу вітчизняних НД;
- вивчення зарубіжного досвіду;
- розроблення оригінальних методик випробування та калібрування;
- підвищення точності, заміна або модернізація (удосконалення) еталонів іонізаційного випромінювання, тощо і, як результат, покращення засобів виміральної техніки галузі.

РОЗДІЛ 1. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЕННЯ

1.1. Основні поняття та дозиметричні величини

При розпаді ядер радіоактивних речовин виділяється 3 види випромінювань: α , β -частинки та γ -промені. α -частинки - це позитивно заряджені ядра гелію; β -частинки - це електрони або позитрони; γ -промені - це електромагнітні хвилі з довжиною біля 0,1 нм і менше. Радіоактивний розпад характеризується такими величинами, як сталою розпаду, періодом напіврозпаду та активністю радіоактивної речовини. Проходження рентгенівських (γ) променів, а також (α , β -частинок крізь речовину супроводжується іонізацією атомів цієї речовини. Під час іонізації випромінювання втрачає частину своєї енергії, тобто відбувається поглинання речовиною енергії випромінювання [13-14].

Ступінь іонізації речовини, а також кількість поглинутої речовиною енергії випромінювання є мірою взаємодії випромінювань з речовиною і є основою визначення величин, що використовуються для характеристики цієї взаємодії.

Для того, щоб охарактеризувати рентгенівське, альфа- й бета-випромінювання вводяться такі величини:

- густина потоку іонізуючих частинок чи квантів;
- інтенсивність випромінювання;
- поглинута доза рентгенівського (гамма) випромінювання;
- експозиційна доза рентгенівського (гамма) випромінювання;
- потужність експозиційної дози.

Іонізуюче випромінювання характеризується таким величинами [4-6,13-21]:

- **періодом напіврозпаду** — тобто часом, впродовж якого розпадається половина радіоактивних атомів ізотопу; при цьому, період напіврозпаду вимірюється у секундах;

– **сталію радіоактивного розпаду** — тобто величиною, рівною частці радіоактивних атомів, що розпадаються за 1 с.;

- **густиною потоку іонізуючих частинок** чи квантів — тобто величиною, що дорівнює відношенню числа частинок чи квантів іонізуючого випромінювання, які потрапляють в елементарну сферу за одиницю часу, до площі її поперечного перерізу;

- **інтенсивністю випромінювання** — тобто величиною, що дорівнює відношенню енергії іонізуючого випромінювання, яке потрапляє в елементарну сферу за одиницю часу, до площі попереднього перерізу цієї кулі;

- **поглинутою дозою випромінювання** (дозою випромінювання) — зокрема величиною, що дорівнює відношенню енергії будь-якого іонізуючого випромінювання до маси опроміненої речовини.

Іонізуюче випромінювання характеризується низкою параметрів і величин. Серед них значну групу формують енергетичні величини. Одиниці величин у галузі іонізуючих випромінювань нормуються міжнародними стандартами, де, разом з тим, допускають використовувати позасистемні одиниці щодо радіоактивності та характеристик доз випромінювань.

Зокрема, *поле випромінювання* або частина простору, пронизана іонізаційним випромінюванням, може описуватись:

- видом частинок (фотони, електрони, іони тощо); їх кількістю в 1 см^2 і енергією;

- інтенсивністю (тривалістю) розпаду джерела випромінювання; енергією, напрямком і геометрією.

Потік іонізуючого випромінювання — це число іонізуючих частинок N , які проходять крізь цю поверхню за певний інтервал часу t :

$$F = dN / dt, \text{ c}^{-1}. \quad (1.1)$$

Густина потоку іонізуючих частинок – це відношення цього потоку dF до площі поперечного перерізу поверхні dS , яку вони пронизують:

$$\phi = \frac{dF}{dS} = \frac{d^2N}{dSdt} [i^{-2} \bar{n}^{-1}] \quad (1.2)$$

Не всі ядра радіонуклідів розпадаються з однаковою швидкістю під час радіоактивного розпаду. У результаті експоненціальне правило передбачає, що кількість радіоактивних атомів з часом зменшиться:

$$N(t) = N_0 e^{-ct}, \quad (1.3)$$

де c – стала розпаду, яка характеризує його швидкість (c^{-1}). Для характеристики сталої розпаду застосовують поняття *періоду напіврозпаду* $T_{0,5}$, який дорівнює часу, впродовж якого розпадається половина початкової кількості ядер цього радіонукліда.

Однією з основних характеристик радіоактивних речовин є *активність радіоактивного ізотопу*. Вона відображає відношення кількості актів розпаду dN , які відбуваються за інтервал часу dt , до цього інтервалу часу, тобто:

$$A = dN / dt. \quad (1.4)$$

Одиницею активності радіонукліда є беккерель ($Bк$), що має розмірність $1/c$. Беккерель відповідає активності радіонукліда у джерелі, де за $1 c$. відбувається один спонтанний перехід нукліда із одного енергетичного стану до іншого.

Об'ємна активність джерела випромінювання відповідає відношенню активності A радіонукліда у джерелі до його об'єму V :

$$A_v = A / V. \quad (1.5)$$

Одиницею об'ємної активності є $Bк/м^3$.

Питома активність джерела випромінювання — це активність A одиниці маси m радіонукліда, що визначається співвідношенням $A_m = A / m$ і вимірюється у $Bк / кг$.

Оскільки в радіології та медицині використовується іонізуюче випромінювання, необхідно вирішити питання захисту від іонізуючого випромінювання. Фізіологічний вплив радіації на організм людини не можна повністю описати її об'єктивними фізичними властивостями. Вони використовуються в поєднанні з конкретними фізичними змінними, які описують біологічний вплив іонізуючого випромінювання. Ці значення є дозиметричними [15,19,22-25].

Отримана (поглинута) радіаційна доза – це енергія, поглинута речовиною внаслідок її опромінювання, віднесена до одиниці маси цієї речовини. Вона

вимірюється у Грєях (1 Гр відповідає 1 джоулю на кг) і рад (аббревіатура від Radiation Absorbed Dose – rad): $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 10^{-2} \text{ Гр}$, $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$.

Поглинута доза є фундаментальним показником, оскільки біологічна дія випромінювання пов'язана з енергією випромінювання, що її витримує жива тканина. Допустимі дози опромінювання живих організмів становлять $10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ Гр}$. Такі числові значення величини незручні для користування, тому застосовується експозиційна доза, як міра іонізації рентгенівським (гамма-) випромінюванням. Вона є сумою електричних зарядів усіх іонів одного знаку в певному елементі об'єму повітря, поділеною на масу повітря у цьому об'ємі. Одиницею експозиційної дози є один Р (рентген).

Стосовно біологічної експозиції, то розрізняють гостру експозицію, що отримана за короткий інтервал часу, і хронічну, отриману за тривалий період. Із 1985 року системою СІ введено єдину одиницю вимірювання поглинutoї дози – "кулон на кілограм", пов'язану з рентгеном співвідношенням: $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$. Часто користуються терміном "**інтенсивність дози**", що описує дозу опромінювання за одиницю часу (до прикладу, інтенсивність природнього фону в повітрі м.Львова на 20 березня 2011 р. становила 12 мкР / год.).

У радіаційному захисті використовують термін "**еквівалентна доза**". Вона відрізняється від отриманої дози тим, що є суто розрахунковою величиною і характеризує міру небезпеки радіоактивних частинок. Еквівалентна доза визначається як добуток поглиненої дози D і коефіцієнта якості q (коефіцієнта передавання енергії): $H = D q$.

Одиницею еквівалентної дози є зіверт, а її розмірність така ж, як і поглиненої дози. Зіверт дорівнює еквівалентній дозі, для якої добуток одержаної дози у біологічній тканині на усереднений коефіцієнт якості дорівнює 1 Дж/кг . Раніше застосовувалась одиниця еквівалентної дози *рем* (roentgen equivalent for man – rem), або *бер* – "біологічний еквівалент рентгену": $100 \text{ бер} = 1 \text{ Зв}$. [21].

З іншого боку, іонізуюче випромінювання — це будь-яке випромінювання, яке при взаємодії з речовиною викликає утворення в цій речовині іонів різного знаку. Електрони атомів можуть бути видалені іонізуючим випромінюванням. Існують два види іонізуючих випромінювань: корпускулярне, що формується

частинками з масою спокою, нерівною нулевій (α -, β - і нейтронне випромінювання); електромагнітне (γ -випромінювання й рентгенівське) з дуже малою довжиною хвилі. Іонізуюче випромінювання можна класифікувати як пряме або непряме. Заряджені частинки, такі як електрони, протони та α -частинки, які мають достатню кінетичну енергію, щоб іонізуватися під час удару та негайно відштовхувати орбітальні електрони від атомів, утворюють пряме іонізуюче випромінювання. Незаряджені частинки, такі як нейтрони або фотони, які створюють пряме іонізуюче випромінювання та/або ядерні процеси, утворюють непряме іонізуюче випромінювання. Ці вторинні частинки вже іонізують атоми та/або викликають ядерні зміни, коли їхня енергія передається першій зарядженій частинці (протону чи електрону).

1.2. Проблеми безпеки при використанні джерел іонізуючих випромінювань

Через можливий ризик того, що така операція може загрожувати суспільству та навколишньому середовищу через радіаційну шкоду, питання безпеки є унікальними за своєю природою. Тому проблема радіаційного захисту працівників, населення та навколишнього середовища нерозривно переплітається з питанням розвитку атомної енергетики та використання джерел іонізуючого випромінювання у ядерній енергетиці та інших галузях промисловості, в медицині. Вкрай важливо розуміти кількісні властивості поля іонізуючого випромінювання, фізичні величини, які визначають вплив радіації на людину та навколишнє середовище, а також методи та інструменти, що використовуються для їх вивчення. Специфіка розвитку вимірювальної техніки визначається характеристиками та особливостями взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною. Для вирішення проблеми обмеження професійного опромінення та підвищення рівня безпеки в цілому необхідно, щоб кожен працівник АЕС був обізнаний з питаннями радіаційної безпеки та захисту. У цьому контексті важливо враховувати ступінь культури безпеки, чинником якої має бути розуміння природи небезпечних розробок, які йдуть рука об руку

з ядерними технологіями. Існує багато способів підвищення культури безпеки, але для фахівців, які безпосередньо мають справу з іонізуючим випромінюванням, усі вони пов'язані з навчанням і постійним вдосконаленням.

Можна сказати, що питання дозиметрії набувають критичного значення в надзвичайних ситуаціях, оскільки вони впливають на прийняття відповідних дій і технічних рішень, спрямованих на ліквідацію наслідків аварії, в тому числі на збереження здоров'я людей. Система радіаційного захисту, що базується на якісних дозиметричних вимірюваннях, надійно захищає людей і об'єкти навколишнього середовища від згубного впливу радіації, що підтверджено більш ніж 50-річним досвідом використання ядерної енергії в мирних цілях. Тому при використанні ядерних технологій першочерговим є питання отримання точних вимірювань радіаційних параметрів, порівняння їх із встановленими межами та розроблення заходів захисту [26-31].

1.2.1. Дозиметрія іонізуючих випромінювань

Дозиметрія, що визначає і пояснює методи вимірювання і оцінки особливостей взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною, а також фізичних характеристик самого іонізуючого випромінювання, розглядається як окремий розділ практичної ядерної фізики.

Вивчення дозиметрії зосереджено на властивостях іонізуючого випромінювання, на які значною мірою впливає іонізація та збудження атомів і молекул у речовині. Він також перевіряє, наскільки широко розсіяні іонізовані та збуджені атоми всередині речовини за наявності іонізуючого випромінювання. Крім дозиметричних і радіометричних приладів, для вимірювання цих характеристик також використовуються хімічні і навіть біологічні методи. Однак для калібрування хімічних і, що більш важливо, біологічних дозиметрів і радіометрів необхідно використовувати фізичні інструменти, і вони можуть розглядатися як вимірювальні прилади лише в тому випадку, якщо після такого калібрування вони точно вимірюють фізичні якості. Скрізь, де ведуться роботи з радіоактивними джерелами, в тому числі в

медицині, промисловості, наукових дослідженнях, атомній енергетиці при будівництві, експлуатації та виведенні з експлуатації атомних електростанцій, використовуються методи дозиметрії іонізуючого випромінювання. Такі фізичні параметри, які пов'язані з очікуваним радіаційним ефектом, є предметом дозиметрії. Найважливішою характеристикою дозиметричних і радіометричних величин є визначення зв'язку між вимірюваною фізичною величиною та очікуваним радіаційним ефектом. Щоб виявити, оцінити та запобігти потенційній радіаційній небезпеці для людей і навколишнього середовища, основною роботою є кількісне визначення дози радіації в різноманітних матеріалах, середовищах існування та, зокрема, в тканинах живого тіла. Іншими словами, головною метою дозиметричних вимірювань є забезпечення радіаційної безпеки при роботі в середовищах з іонізуючим випромінюванням. Радіаційна технологія вважається безпечною, якщо вона не перевищує встановлені дози радіаційного опромінення персоналу, населення та навколишнього середовища при нормальній експлуатації та проектних аваріях, обмежує це опромінення при надзвичайних обставинах і аваріях і не виділяє надлишкових кількостей радіоактивних речовин в навколишнє середовище. При роботі з джерелами іонізуючого випромінювання ця якість реалізується шляхом застосування певних норм і правил безпеки.

Радіаційна безпека ґрунтується на визначенні допустимих меж радіаційного опромінення працівників, населення та навколишнього середовища, встановлених нормами, правилами і стандартами безпеки. У сфері забезпечення радіаційної безпеки особливу увагу приділено питанню нормування доз опромінення. Допустимі значення дози, які вперше становили 10 рад на добу, були вперше запропоновані в 1902 році. Основна межа дози для працівників наразі встановлена на рівні 20 мЗв на рік, а для населення – 1 мЗв на рік. З часом це число поступово зменшувалося. Що стосується обсягу та рівня вимог, встановлених для неї відповідними правилами та положеннями, жодна сучасна технологія не може бути порівняна з радіаційною технологією. При необхідному виконанні цих умов можна гарантувати безпеку експлуатації радіаційних технологій, забезпечити високий ступінь здоров'я персоналу,

забезпечити екологічно чисте середовище проживання. Дозиметрія є дуже точною прикладною наукою, але через те, наскільки різноманітними та нетрадиційними можуть бути її застосування, використання результатів як окремого критерію для прийняття конкретного рішення потребує глибокого розуміння та збалансованого підходу.

Усе це змушує суспільство вдосконалювати своє розуміння того, як радіація впливає на організм людини, і шукати нові способи вимірювання рівнів радіації, які базуються на розумінні фізичних явищ, які виникають, коли радіація взаємодіє з речовиною. Це робить цей напрямок дослідження інтригуючим і привабливим для дослідників.

1.3. Метрологічні ризики виготовлення, калібрування і експлуатації елементів конструкції ЗВТ

Коли портативні ЗВТ працюють в умовах значних електричних та енергетичних навантажень [32], наявність метрологічно визначених ризиків може призвести до фінансових втрат, втрати працездатності тощо. Їх видалення з ринку для споживачів нічого не означає; скоріше, це просто підкреслює важливість закупівлі в компанії чи організації, яка може надати гарантії щодо їхніх метрологічних якостей, наприклад, високоякісних дозиметрів.

Відповідно до стандарту [33], який стосується роботи та обробки результатів лабораторіями калібрування та випробувань, а також дослідження можливості, важливо вивчати різні прояви метрологічних та економічних ризиків, спричинених зміни технології виробництва, а також дослідження можливостей методологічного та методичного оновлення розглядуваних ЗВТ у напрямку мінімізації ризиків. Для цього звернемо увагу на вивченні статистично-метрологічних особливостей технології метрологічного забезпечення метрологічно-ризикових аспектів та зниженні рівня ризику при ефективному використанні можливостей метрології.

Ми почнемо з вивчення економічної та метрологічної небезпеки як двох взаємопов'язаних категорій ризику, взаємозв'язок яких стає очевидним у

компонентах ЗВТ, які перевіряються під час впливу радіації. В останніх виділяються, як потенційно слабкі, «точки» з максимальною розсіюваною потужністю. Взагалі-то, термодинамічний підхід передбачає оцінювання згаданої потужності через розгляд основного рівняння термодинаміки [34]. Таким чином, в зоні, де існує посилене виділення ентропії, фіксуються фізико-хімічні та інші процеси, які суттєво погіршуються надійність [35]. Тобто, експлуатація ЗВТ, виготовлених з порушеннями технології, призводить до посилення ризиків його відмови.

Жорсткі вимоги щодо конструкції ЗВТ полягають у забезпеченні якості, в першу чергу, елементів його сенсорної групи та зон їх під'єднання до самого провідника. Не вдаючись до технології виготовлення самих ЗВТ, оскільки представляю метролога з його метрологічними забезпеченням процесу перевірки та калібрування, відзначу, що мінімальні відхилення на будь-якій попередній технологічній ланці виробника ЗВТ можуть призвести і призводять до ризиків у наступних ланках, у тому числі на стадії метрологічної перевірки у спеціальній лабораторії ДП «Київоблстандартметрологія», і так аж до кінцевого споживача.

До ризиків можна підходити економічно, в тому числі метрологічно. Розподіл ризиків є широко прийнятою концепцією в усьому світі. Незважаючи на те, що ці цінності могли бути придатними в їх початковому контексті, галузь зосередилася на тому, щоб товар або послуга, що пропонується, відповідали цим стандартам. Споживач буде страждати від наслідків дефекту, і ці наслідки можуть бути досить серйозними [36]. Давайте поміркуємо про слабкий елемент дозиметра, яким є електронна мікросхема, тоді проблема відразу стає гранично зрозумілою. А наслідок цього – відомий: радіаційне опромінення окремих осіб і навіть частини людської популяції.

У зв'язку з цим ЗВТ повинні відповідати відповідним вимогам, а метрологічні показники повинні постійно контролюватися у виробничій практиці. Слід мати на увазі, що вони повинні бути встановлені з урахуванням відповідних прийнятних ризиків для клієнтів і виробників ЗВТ відповідно до [37] на додаток до бюджету невизначеності (шляхом оцінки впливу приладу по відношенню до інших внесків невизначеності). Отже, виходячи з того факту, що

планове калібрування є практикою, яка належить до галузі законодавчої метрології та не обов'язково відповідає справжнім потребам промислової реальності, тобто для подолання ризиків, пов'язаних з кожним рішенням, планове калібрування є практикою.

- Метрологічні підходи до ризиків

Емпіричні правила, такі як правило Gagemaker, використовувалися для встановлення значення точного та точного інструменту метрології. Але практично до статистичного визначення ймовірності неправильної класифікації продукції під час метрологічних випробувань ми пішли з появою статистичного процесу управління виробництвом. Імовірність того, що хороший продукт може бути позначений як поганий продукт, і навпаки, визначається низкою факторів, включаючи розподіл процесів, точність і точність інструментів метрології, методології вимірювання тощо.

Потім функцію ймовірності можна перетворити на значення, яке представляє частку неправильно класифікованих продуктів. Ціна неправильної класифікації, яка залежить від точності, точності та використовуваної техніки вимірювання, може бути визначена за цією цифрою. Ця вартість може бути використана для вирішення питання про те, чи потрібна метрологія взагалі, чи виправдовувати розвиток нових можливостей метрології, чи вдосконалювати методи вимірювання тощо. Були надані приклади справжніх витрат, пов'язаних із використанням метрологічного інструменту нижче рівня, а також підходи, які було запропоновано врахувати вартість неправильної класифікації [38].

1.3.1. Технологія виробництва і калібрування засобів вимірювальної техніки та їх метрологічне забезпечення

Виробничі процедури для компонентів ЗВТ стають дедалі складнішими, і для забезпечення високої якості продукції додаються додаткові етапи контролю. Методика ще більше ускладнюється численністю їх сортів. Незважаючи на необхідність етапів контролю, виробник може ігнорувати більшість із них, оскільки вони часто не є процесами з доданою вартістю, що підвищує ціну

готового продукту. Метою виробника є знаходження балансу між виконанням відповідної кількості контрольних процедур і досягненням високої продуктивності [30].

Нижче ми обговоримо підходи до оптимізації параметрів відбору (кількості зразків і частоти перевірок) і розробки нових динамічних стратегій для зниження ризику під час виробництва та експлуатації ЗВТ ІВ на основі аналізу різних характеристик метрологічних заходів і методи.

Крім того, ми надамо систему, яка допоможе вибрати найкращий підхід до відбору проб на основі метрологічних параметрів і рівнів ризику. Результати показали, що якщо стратегія вибірки обмежена технологічними машинами з постійною частотою вибірки, можна уникнути зайвих заходів. З іншого боку, прості метрологічні системи — ті, що оцінюють параметри структурного елемента, не пов'язані з типом продукту — можуть прийняти підхід вибірки. Процес зміни стратегії вибірки включає пропозицію обчислити нові коефіцієнти, які використовуватимуться з новим підходом до вибірки.

У роботі [40] пропонуються нові підходи до оптимізації вибірки для різних типів ЗВТ з урахуванням можливостей метрології та уточнення параметрів обрахунку, таких як продуктивність калібрування у межах партії ЗВТ. Оптимізація опромінення осіб, що обслуговують цикл метрологічного забезпечення, вимагає ефективнішого використання технологічного устаткування, а це залежить від його характеристик, яким слід приділяти більше уваги.

Зупинимось на методах вибірки. Відомими є статичний, адаптивний та динамічний методи [41]. Перший з них концентрує увагу на визначенню партій виробів, що підлягають вимірюванню і не допускає жодних можливих змін. Другий – названий адаптивним методом означає лоти, які мають вимірюватись з самого початку за допомогою належних правил, про те тут передбачено можливість виконувати або не виконувати вимірювання (залежно від отриманої виробничої інформації). Цікавою вважається динамічна вибірка, яка реалізується у режимі реального часу для будь-яких партій виробів, залежно від потужностей

метрології. Недоліки переважно притаманні статичній вибірці [42], оскільки певні вироби можуть взагалі не підлягати перевірці.

У нашій галузі здійснимо статичну вибірку із певним значенням коефіцієнта вибірки - " $1/N$ ", де N – це кількість партій продукції у групі ризику. Тобто, для співвідношення $1/8$ одна партія із 8-ми вироблених підлягає контролю. Якщо у кожній партії міститься 9 ЗВТ, то під загрозою відсутності контролю перебуває 63 таких ЗВТ.

Інакше ЗВТ@R (ЗВТ під ризиком) - це показник або індикатор для управління рівнем ризику ЗВТ. Він вказує на кількість виготовлених ЗВТ, що опиняються під загрозою між двома черговими подіями.

Також виявлено, що використання деяких метрологічних методів залежить не тільки від контрольованого об'єкта, але й від відбору проб і можливостей технологічного обладнання (наприклад, конкретного технологічного обладнання для калібрування ЗВТ). Такий технологічний засіб можна розглядати як еталонну установку в даній роботі з надзвичайно активними джерелами гамма-випромінювання. У зв'язку з необхідністю забезпечення рівномірності поля їх одночасного опромінення та обмеженням часу роботи обладнання, що не дозволяє підвищити продуктивність калібрування більше 10 проб за зміну, його можливості обмежують кількісний відбір проб невеликою кількістю – немає більше 10 одночасно.

У цьому контексті акцентуємо на поглибленому вивченні чинної на ДП «Київоблстандартметрологія» системи контролю і дотримання якості, у тому числі заходів стосовно забезпечення вибірки ЗВТ. Дане ДП тривалий час пропонує підприємствам галузі розробляти методи ефективного і швидкого виявлення відхилень у чинних технологічних процесах, підвищуючи рівень якості, зокрема через оцінювання відповідності [7,32,42-46]. При цьому, пріоритетними стають покращення надійності техпроцесів та якості устаткування. Останнє передбачає виконання операцій контролю на підприємствах-виготовлювачах ЗВТ здійснювати для 100%-ої вибірки ЗВТ.

На жаль, чинні ризики, зумовлені неналежним рівнем контролю щодо технології виготовлення ЗВТ, призводять до виникнення і можливого повторення з часом дефектів, що проявляються у кінцевого споживача.

У роботі запропоновано низку заходів, здатних за рахунок збільшення ризиків виробника знизити ризики кінцевого споживача. До таких відносимо різні заходи додаткового контролю виробника ЗВТ і відповідного жорсткіше приймання зразків ЗВТ на калібрування (Акт відбору у зразків ЗВТ).

Враховуючи досвід [40-43], оцінимо наступний вид вибірки - динамічну вибірку – щодо особливостей вирішення завдань власних досліджень. Дана вибірка ґрунтується на власних критеріях стосовно вибору найкращих партій продукції при їх контролі у реальному часі, залежно від поточної виробничої ситуації. Тут відсутні наперед встановлені правила, на етапі що передують вимірюванням. Даний метод відзначається кращим керуванням потужностями повірки та калібрування стосовно інших відомих методів вибірок.

Стартові праці у галузі, що описували метод динамічного відбору партій електронної техніки описано [44], де керували чергою на «метрологічні дослідження», сполучаючи окремі правила вибірок у одне ціле. Таким чином реалізували алгоритм реагування на варіації умов виготовлення, що дав змогу посилити гнучкість управління внаслідок встановлення жорстких правил вибірок. Запропоновано алгоритм оптимізації кількості виробів, фокусуючи увагу на правилах відбору; на присвоєнні певних «мінусів» чи «плюсів» кожному правилу вибірки. Як наслідок, згодом, залучивши змішану лінійну програму, відбирають об'єкти, що характеризуються зменшеною мінусовою сумою.

Наступним етапом розробили об'єднану програму відбору об'єктів, що ефективніше контролює тривалість циклу при дотриманні належної якості виготовлюваної продукції. Для запобігання відбору надмірної кількості об'єктів, залучено таке виконання вибірки, щоби розрізнити продукти з систематичними і випадковими дефектами. Для цього запропоновано [45] такий алгоритм планування й реалізації вибірки, щоби динамічно мінімізувати ризики на основі глобального показника вибірки - Global Sampling Indicator (GSI), який був визначений для вибору партій для вибірки та планування їх дослідження.

Використано метрологічні інструменти, які полягають у приписанні певної ваги кожній партії продукції, що поступає на вимірювання [46]. Симулятор S5 (Smart Sampling Scheduling and Skipping Simulator) створено і опробовано, показано, що ризику можна істотно зменшити, дотримуючись обмеженої кількості заходів (векшопів) [47]. Стратегія динамічної вибірки – це високоточний метод керування заходами, що виконуються для обрання оптимальної кількісно вибірки із забезпеченням оптимальної пропускної здатності за метрологічними потужностями при скороченому часі циклу і збільшеній продуктивності.

Отже, покладаючись на досвід [48-52], пропоную нижче нові рішення щодо впровадження методу динамічної вибірки на операціях калібрування ЗВТ ІВ.

1.4. Нормативна документація метрологічного забезпечення засобів вимірювань іонізуючих випромінювання, засоби та еталони

Чинна нормативно-технічна документація може розглядатись, у першу чергу, за походженням. Це зумовлено тим, що темою дисертаційної роботи визначається, як пріоритет, на основі реальних напрацювань системи ДП «Київоблстандартметрологія», осучаснення і модернізація метрологічного забезпечення в працездатній та небезпечній для дослідників і людської популяції у цілому галузі, якою вважається [26-27] радіаційна безпека, під вимоги стандартів Європейського Союзу. Тому насамперед, розглянемо нормативно-технічні документи, а також близьку до них за змістом нечисельну науково-технічну літературу попереднього періоду. До них відносяться:

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність».
2. ГОСТ 8.087-81 Установки поверочные дозиметрические фотонного и электронного излучений. Методы и средства поверки [53].
3. МИ 1788-87 Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы дозиметрические для измерения экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы, поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы в воздухе фотонного излучения. Методика

поверки [54].

4. Ю. И. Брегадзе, Э. К. Степанов, В. П. Ярына. Прикладная дозиметрия ионизирующих излучений. Энергоиздат. Москва, 1990 [55].

5. Исследование возможности градуировки блоков детектирования фотонного излучения с использованием рентгеновской установки, Л. Л. Синников, Э. Ф. Андриевский. АНРИ №1(80) 48-51, 2015 [56].

6. ГОСТ 8.308-78 Метрология. Функциональные узлы, блоки и устройства аппаратуры для измерения ионизирующих излучений. Счетчики импульсов. Методы и средства поверки [57].

7. ОСПУ-2005 Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України [58].

8. НРБУ-97 Норми радіаційної безпеки України [59].

Далі приведемо актуалізовані в Україні міжнародні стандарти галузі, якими активно користуються підприємства та організації галузі:

1. ДСТУ ISO 4037-1:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 1. Характеристики випромінення та методи їх створення (ISO 4037-1:1996, IDT) [65].

2. ДСТУ ISO 4037-2:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 2. Дозиметрія для радіаційного захисту в діапазонах енергій від 8кeВ до 1.3 MeВ та від 4MeВ до 9 MeВ (ISO 4037-2:1997, IDT) [66].

3. ДСТУ ISO 4037-3:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 3. Калібрування просторових та індивідуальних дозиметрів і вимірювання їх чутливості як функції енергії та кута падання (ISO 4037-3:1999, IDT) [67].

4. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT) [68].

5. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-4:2018. Непевність вимірювання, ч.4. Роль невизначеності вимірювань під час оцінювання відповідності, (ISO/IEC Guide 98-4:2012, IDT) [69].

6. ДСТУ ISO/IEC Guide 60:2007. Оцінювання відповідності. Кодекс ustalеної практики, 2008 [70].

7. Керівництво з виразу невизначеності вимірювань (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [71].

Також приведемо низку додаткових матеріалів, причетних до нормативно-технічної документації:

1. ISO 1677:1977. Sealed radioactive sources –General. [On-line]. Available: <https://www.iso.org/standard/6291.html> [60].

2. Safety reports Series №16. Calibration or radiation protection monitoring instruments, 2000 [61].

3. COOMET R/GM/32:2017. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределённости [62].

4. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology. – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – JCGM. – 2008 [63].

5. EA-4/02 M:2022 Вираження непевності вимірювання при калібруванні [64].

На основі зазначених джерел та спектру наявного устаткування, включаючи джерела іонізаційного випромінювання та їх еталонну базу, у межах виконання дисертаційної роботи розроблено на базі ДП «Київоблстандартметрологія» методики калібрування МК-IR-03-2020 “Дозиметри, вимірювачі потужності дози гамма- та рентгенівського випромінення”; МК-IR-04-2020 “Устаткування рентгенівського випромінення, дозиметричні устаткування та радіонуклідні джерела гамма-випромінення”; досліджено процедури передачі розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних установок колімованої геометрії типу УПГД-2 та для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами типу УПД-ІНТЕР, що дало змогу підвищити точність калібрування як самих устаткування, так і дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз.

Висновки до розділу 1

У розділі обговорюється наукове-технічне обґрунтування дисертаційної роботи, що формує базу радіології та дозиметричних вимірювань. Вивчено питання метрологічних ризиків виготовлення, калібрування і експлуатації елементів конструкції ЗВТ.

Окрема увага приділяється чинній нормативно-технічній документації, як України, так і ЄС, стосовно аспектів розвитку методів і засобів метрологічного забезпечення засобів вимірювань іонізуючих випромінювань.

Явища розпаду радіоактивної речовини покладені в основу роботи лічильників іонізуючих випромінювань, а також еталонів випромінювань, які використовуються у схемі передавання розміру одиниці випромінювання від згаданого еталону через робочий еталон до конкретних ЗВТ (Додаток 1). Оскільки це - відпрацьована методологія [1-2,4,56-57], то надалі у розділах дисертації розглядаються методологія метрологічного забезпечення засобів вимірювань іонізуючих випромінювань [5-6,61]. При цьому, як ЗВТ аналізуються і оцінюються за метрологічними характеристиками, широко використовувани в Україні і світі дозиметричні засоби вимірювальної техніки. Останні поступають на калібрування (півірку) згідно встановленого графіку у спеціалізовану лабораторію ДП «Київоблстандартметрологія». Технічний регламент передбачає ті чи інші види перевірок стосовно тих чи інших видів дозиметричних засобів, на які за результатами перевірки видаються Сертифікати та паспорти конкретних зразків із зазначенням метрологічних характеристик. Немаловажне значення у забезпеченні вимірювань дозиметричних величин приділяється еталонам інтенсивності (дози опромінення).

У даному випадку ДП «Київоблстандартметрологія» отримує і користується робочими еталонами, які, у свою чергу, проходять калібрування за Державним еталонном, що зберігається у Національному науковому центрі «Інститут метрології», м. Харків.

Надалі переходимо через подальшою методологією досліджень до формування на документальному рівні методик, що враховують конкретні характеристики засобів метрологічного забезпечення для калібрування

дозиметричних пристроїв, включаючи еталонні засоби та відповідне устаткування, а також до дослідження процесу калібрування і характеристик відкаліброваних ЗВТ.

При дотриманні норм радіаційної безпеки, метрологічна надійність отриманих результатів повинна гарантуватись дотриманням чинного нормативно-технічного законодавства України і Європейського Союзу, на що і направлена провідна лінія дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ДОЗИМЕТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН, МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЇХ СТВОРЕННЯ

2.1. Стандартні характеристики рентгенівського та гамма-випромінювання

Згідно вимогами [4] (Практично єдиний міждержавний стандарт, який діє в Україні, встановлює вимоги до характеристик стандартного рентгенівського і гамма-випромінювання й методів їх створення) для формування еталонного випромінювання використовуються джерела з нуклідами, вказаними в Таблиці 2.1 [1-2,61,75].

Таблиця 2.1. Радіонукліди та їхні характеристики

№№	Вид радіонукліду	Енергія випромінювання, кеВ	Період напіврозпаду нукліду, доба
1	^{60}Co	1173,3 1332,5	1925,5
2	^{241}Am	59,54	157788
3	^{137}Cs	661,6	11050

Використовувана радіоактивна речовина характеризується природньою радіоактивністю активність, приведеною до одиниці маси. Вона забезпечується за умови, коли потужність керми або дози у повітрі (дія радіоактивних домішок) не перевищує 1% потужності керми у повітрі.

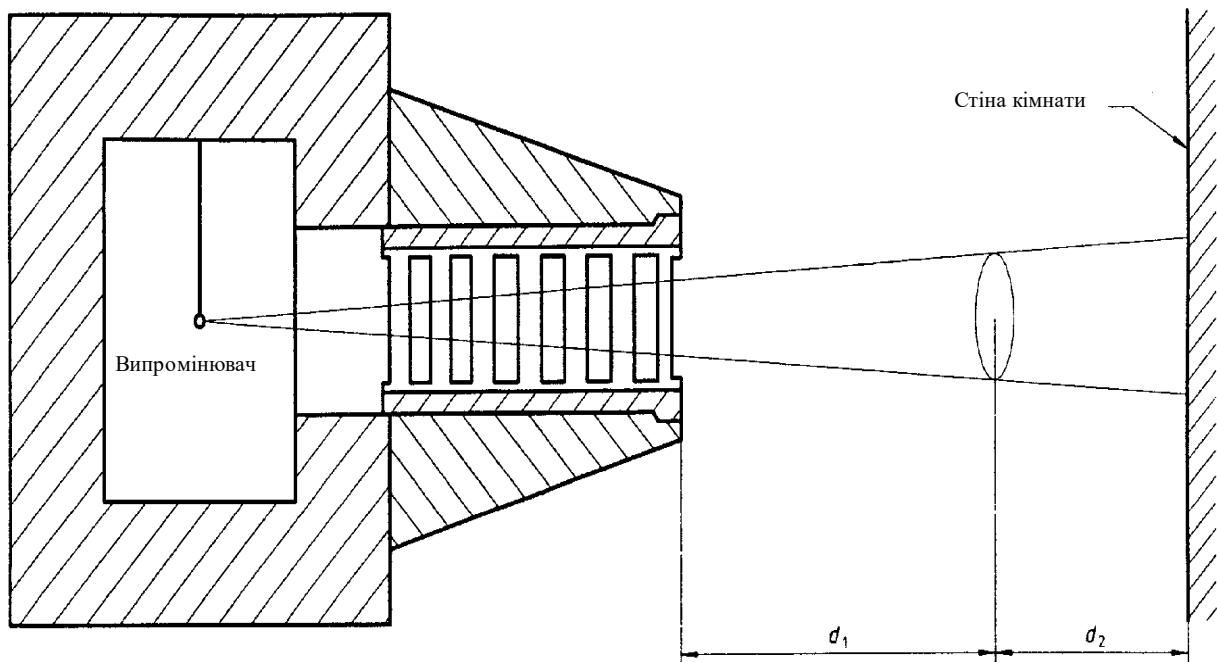
Джерела експлуатуються у капсулах, конструкція яких відповідає вимогам [61]. Капсули забезпечують поглинання бета-випромінювання. При цьому, вклад зовнішнього розсіяного випромінювання у випромінювання від джерела не повинен перевищувати 5% загальної потужності керми в повітрі [1]. Це досягається за

рахунок використання устаткування неколімованої геометрії, коли об'єм опромінення є значним та/або устаткування колімованої геометрії.

До складу еталонного устаткування звичайно входять: ДІВ, високоточні еталонні дозиметри, оснащені іонізаційними камерами та дозиметричне устаткування [80, 86], неколімованої та (або) колімованої геометрії. Високоточні еталонні дозиметри з іонізаційними камерами, що використовуються для передачі розміру одиниці, повинні мати відповідну чутливість для кожного енергетичного рівня та точність [2].

Рекомендовані розміри приміщень для встановлення устаткування неколімованої геометрії становить мінімально: $4 \times 4 \times 3 \text{ м}^3$. ДІВ та іонізаційні камери потрібно розміщувати на половині висоти приміщення та на опорах, які сконструйовано з мінімальною кількістю матеріалів і які мають низький атомний номер.

Схема прикладу устаткування колімованої геометрії представлена на рисунку 2.1.



Рисунки 2.1. Приклад устаткування колімованої геометрії.

Устаткування даного типу рекомендується оснащувати ДІВ з радіонуклідами ^{60}Co та ^{137}Cs , так як вклад розсіяного випромінювання складає

менше 5%. Захисний корпус повинен бути виготовлений зі свинцю та мати таку товщину, щоб забезпечував зменшення флюенсу зовнішнього пучка випромінення, який проходить крізь корпус, до однієї тисячної власного пучка випромінення. Установка колімованої геометрії, представлена на рисунку 1, має коліматор у вигляді конуса з джерелом на вершині.

Коліматор гарантує формування фотонного пучка. Його оснащено принаймні 6-ма послідовними отворами при загальній товщині приблизно 90 мм та відстані між ними - 20-мм. Це - пастки для фотонів, що розсіюються на краях попереднього отвору. Останній отвір має товщину 3 мм та діаметр, що трохи перевищує поперечний перетин пучка в цій точці. Ці отвори виготовлені з вольфрамового сплаву. Склад такого сплаву представлений у [1-2]. Поперечний перетин пучка випромінення повинен бути більшим за поперечний перетин детекторів, які проходять метрологічну перевірку чи калібруються (опромінюються). Відстань d_1 повинна перевищувати, ніж 30 см. Відстань d_2 повинна забезпечувати внесок фотонів, що розсіялися від стінок у сумарну потужність керми в повітрі не вищу ніж 5%.

Також, замість джерел з різними активностями, допускається застосовувати свинцеві атенюатори для змін потужності керми в повітрі. Атенюатори розміщується поблизу діафрагми. Послідовність свинцевих атенюаторів з різними товщинами призводить до зменшення потужності керми у повітрі. Діапазон ослаблення може бути дуже широкий. Але потрібно контролювати спектральну чистоту випромінення.

Щоб запобігти впливу можливого спотворення електронної рівноваги в точці калібрування (тестування, випробування), відстань між свинцевими атенюаторами та точкою калібрування повинна бути, принаймні 100 см.

Узагальнено, можна дійти висновку, що устаткування повинно задовольняти 2-м основним вимогам:

- внесок зовнішнього розсіяного випромінення у сумарне випромінення від джерела у капсулі не перевищує 5 %-ів сумарної потужності керми у повітрі;
- потужність керми у повітрі повинна підлягати закону обернено-пропорційності квадрату відстані від центру ДІВ до центру детектора в межах

5 %-ої похибки [1-2].

2.2. Методи створення (формування) стандартних характеристик рентгенівського та гамма- випромінювання

Оснoву метрологічної бази в Україні в цій галузі складають еталонні (калібрувальні) устаткування типів УПД-1, УППР, УПГД-1 (-2, -3), УПД-Інтер, УПДП -1-5, УПДП-1-3 [1-2]. У більшості: тип УПДП -1-5, тип УПДП-1-3, тип УППР, тип УПД-1 - застосований принцип еквівалентності радіаційних полів. Таким чином, забезпечується перевірка дозиметрів гамма-випромінювання в широкому діапазоні потужностей.

Вищевказані устаткування розроблені приблизно в 80-х роках минулого століття, вони є вузько-функціональні; їх можна застосовувати винятково для калібрування одного або декількох типів дозиметрів, а саме: УПДП -1-5 - для приладів ДП-5; УПДП-1-3 - для приладів ДРГЗ-01, -02, -03, -05; УППР - для приладів СРП-68, СРП-88; УПД-1 - для перевірки індивідуальних дозиметрів (в основному тільки деяких типів) [1]. Також, калібрування цих еталонних устаткування повинно проводитися лише методом групового компаратора, тобто передачею розміру одиниць від еталону до устаткування за допомогою тих типів приладів, які проходять метрологічну перевірку чи калібруються на даній установці.

Фактично, в даний час основним метрологічним засобом перевірки (калібрування) дозиметрів гамма-випромінювання в Україні є устаткування типу УПГД та УПД - Інтер. Розглянемо їх переваги та недоліки. В таблиці 2.2 показані основні характеристики еталонних устаткування УПГД та УПД-Інтер.

Таблиця 2.2. Основні характеристики устаткування УПГД та УПД-Інтер

№ пп	Характеристики	Устаткування УПГД	Устаткування УПД-Інтер
1	ДІВ	^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am	^{137}Cs
2	Діапазон вимірювання, Гр/год	до 5×10^{-2} ¹⁾	до 3 ¹⁾
3	Діапазон оптимальних відстаней, м	0,5 – 5,0 ¹⁾	0,2 – 1,5 ¹⁾

Установка УПД – Інтер (рис.2.2), яка є одна з найбільш поширених в метрологічних організаціях України, забезпечує метрологічну перевірку чи калібрування дозиметрів гамма-випромінення в широкому діапазоні потужностей доз.



Рисунок 2.2. Установка УПД-Інтер.

У конструкції передбачено камеру опромінення та радіаційну головку (коліматор) з атенюаторами-фільтрами, що дають змогу змінювати потужність дози. Бокова поверхня камери виготовлена із сталі товщиною 16 мм, а торцева

сторона із свинцевих блоків товщиною 0,1 м. Габарити - висота 0,758 м, ширина 0,618 м, довжина 1,490 м. Головка радіаційна забезпечує формування пучка випромінення. Вона та атенюатори виготовлені із вольфрамового сплаву. Але установка УПД – Інтер також не є універсальною установкою.

На рис.2.3 приведено отриманий експериментально відгук спектру випромінювання для гамма – детектора CsI із «точковим» джерелом ^{137}Cs [1-2].

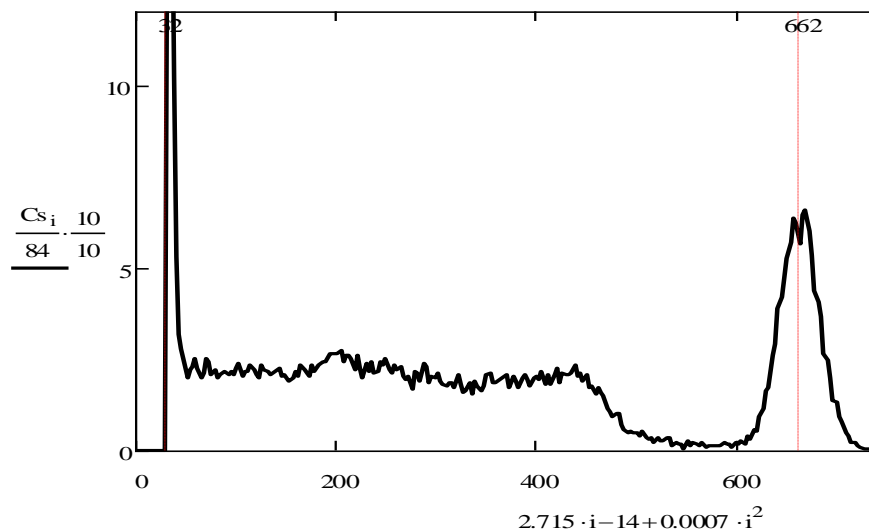


Рисунок 2.3. Апаратурний відгук спектру гамма – детектора CsI із «точковим» джерелом ^{137}Cs .

Як бачимо, згідно рис.2.3, спектр характеризується піком ^{137}Cs з енергією 662 кеВ, тоді коли пік рентгенівського випромінення з енергією 32 кеВ, а також внесок розсіяного випромінення є неістотними. Даний спектр вважається стандартним або «ідеальним».

На рис. 2.4 та 2.5 показані апаратурні відгуки спектрів для гамма – детектора CsI для устаткування УПД — Інтер з ДІВ ^{137}Cs [1-2].

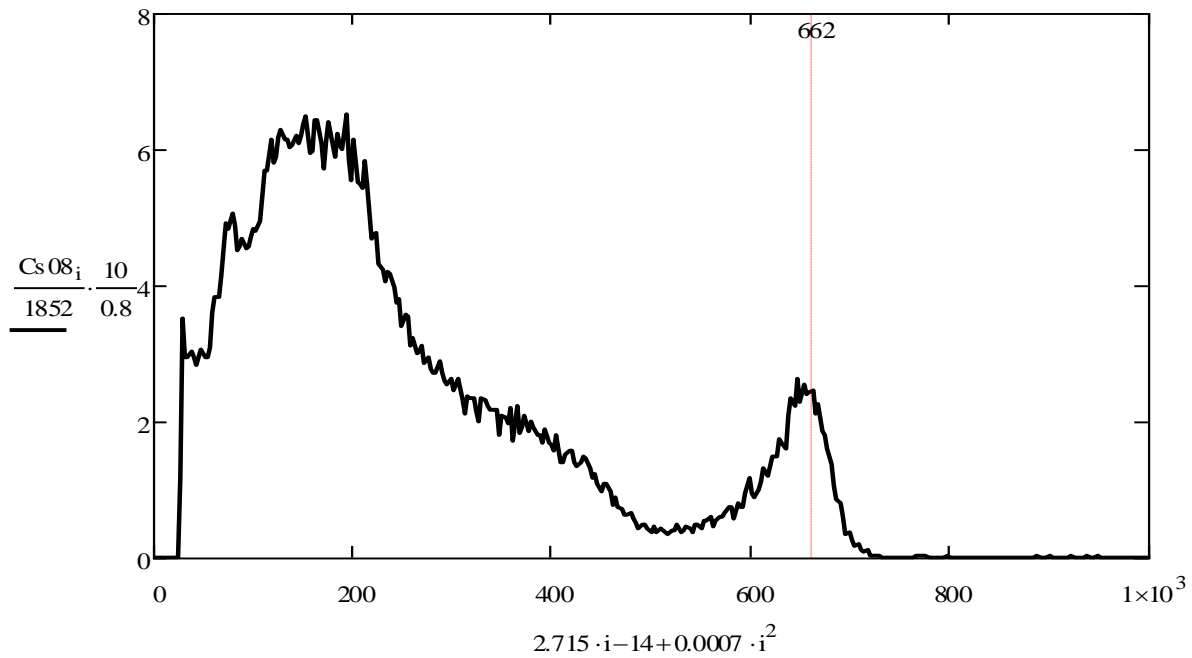


Рисунок 2.4. Апаратний відгук спектру для гамма – детектора CsI із ^{137}Cs д(УПД — Інтер із змінними послаблювачами з вольфрамового сплаву).

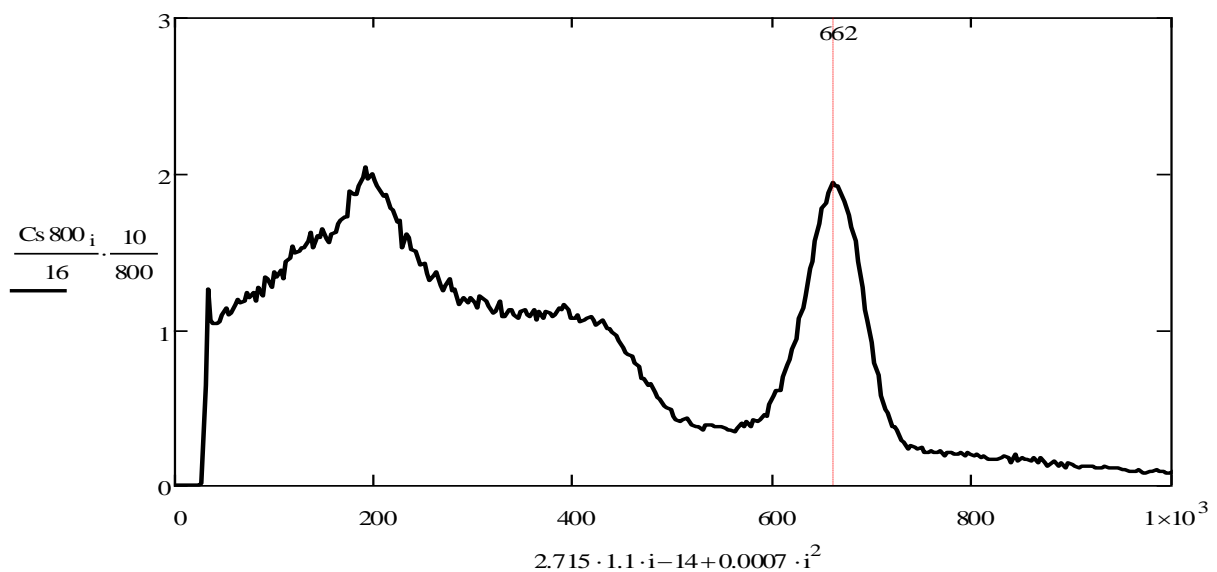


Рисунок 2.5. Апаратний відгук спектру для гамма – детектора CsI із ^{137}Cs (УПД — Інтер без залучення послаблювачів).

Із приведеного спектру видно, що вклад розсіяного випромінювання є значним (помітно значний внесок комптонівського розподілу, коли відношення «пік / комптон» - незначне).

Спектр рис.2.5 отримано без залучення послаблювачів. Тут внесок розсіяного випромінювання менший, але наявний - пік оберненого розсіювання

(~184 keV), як чинник впливу. Видно, що форми цих спектрів відрізняються для різних умовах калібрування.

Тобто, через застосування атенюаторів для ослаблення пучка гамма-випромінення не спроможні точно встановити відстань від джерела до центру блоків детектування ЗВТ, невідомий - спектр гамма-випромінення, а вклад розсіяного випромінення - значний.

2.3 Процедури калібрування засобів вимірювальної техніки рентгенівського та гамма- випромінювання

2.3.1. Основні аспекти калібрування

Прийняття Закону [12] призвело до: розмежування регулюючих, наглядових і інших функцій у сфері; посилення повноважень акредитаційних органів щодо підтвердження компетенції калібрувальних лабораторій; встановлення умов калібрування еталонів цих лабораторій, а також ЗВТ та устаткування випробувальних лабораторій, тощо.

З набуттям чинності даного Закону при калібруванні вимагається визначення метрологічних характеристик ЗВТ: фіксація розміру мір, похибок, калібрувальні характеристики, тощо. Причому всі вони повинні приводитися із відповідними непевностями.

Форми подання у формі таблиці або функції калібрувальних характеристик різняться, а саме:

— для однозначних мір приводять нове значення або поправка (адитивну чи мультиплікативну);

– для багатозначних мір - сукупність нових значень чи поправок для всіх калібрувальних точок діапазону;

Допускається задавати калібрувальну характеристику поправками (адитивною чи мультиплікативною) щодо номінальної калібрувальної характеристики, також приводиться нестабільність (нелінійність) калібрувальної характеристики, СКВ показів, тощо.

2.3.2. Проблеми калібрування та метрологічної перевірки

Втім, необхідність проведення калібрування у новому сенсі для дозиметричних ЗВТ призвела до виникнення значної кількості питань.

Перше з них – це питання представлення результатів калібрування (форма представлення калібрувальних характеристик).

Переважно ЗВТ іонізуючих випромінень мають лінійну калібрувальну функцію (градувальну характеристику), яка проходить через нуль. Тому, згідно з [6,72-75] при калібруванні ЗВТ повинен визначатися калібрувальний коефіцієнт K ($y = K \times x$).

На практиці більшість калібрувальних лабораторій в Україні надають, як вихідні дані - калібрувальні характеристики ЗВТ у вигляді адитивних поправок, іноді лише для 1-єї точки діапазону.

Слід мати на увазі, що ЗВТ калібрують за допомогою спеціальних ДІВ (різні типи випромінення, енергії, тощо) [4,6] Вказані засоби не спроможні здійснювати моніторинг полів гамма – або рентгенівського випромінення з енергіями, відмінними від енергії еталонного випромінювання.

Як наслідок, певні випробувальні лабораторії мають труднощі із поданням результатів вимірювань, оскільки важко врахувати особливості калібрувальних характеристик, включаючи непевності.

При проведенні калібрування невід'ємною частиною є оцінка непевності. У Законі [12] та у VIM [63]: Калібрування визначають, як сукупність операцій, за допомогою яких визначається співвідношення між величинами, що забезпечуються еталонами з їх непевностями, та показами каліброваних засобів із вже їхніми непевностями, а далі отримана інформація служить базою для встановлення співвідношень при отриманні результатів вимірювань. Одночасно рекомендації [62] фіксують вимірювання, яку сукупність операцій встановлення співвідношень між величинами, отриманими за допомогою конкретного ЗВТ і величинами, визначеними з допомогою еталону. Як наслідок, в Україні ще використовують повірку ЗВТ, тобто верифікацію, а у світі - калібрування. Тому

акредитовані НААУ калібрувальні лабораторії вимагають дотримання вимог, регламентованих [32], що базуються на визначеннях VIM.

На рис.2.6 показані результати калібрування в вигляді графіків згідно з визначенням VIM.

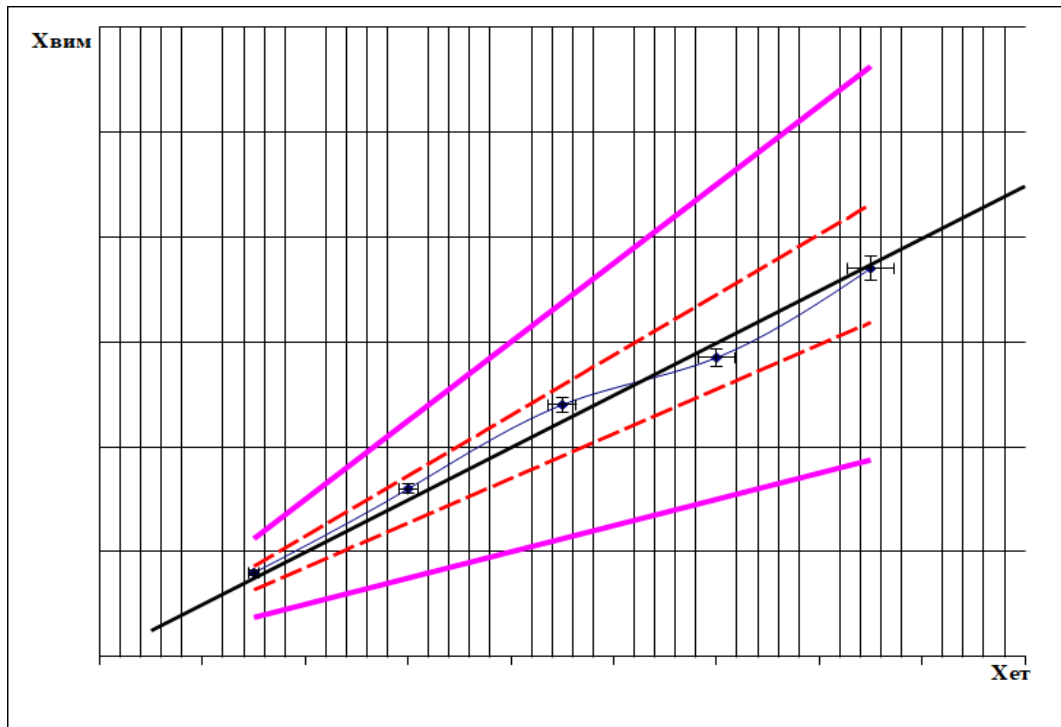


Рисунок 2.6. Результати калібрування згідно рекомендацій VIM.

Синім кольором позначено результати з непевностями. Чорним кольором показано побудоване за результатами вимірювань “співвідношення” між вимірним значенням та еталонним, тобто калібрувальна характеристика: з неї може встановлюють співвідношення, що дає змогу визначити результат, виходячи з показів ЗВТ. Червоним пунктиром відзначені межі довірчого інтервалу калібрувальної характеристики - непевність результатів калібрування.

Звідси, можна констатувати, що калібрувальна характеристика є метрологічною характеристикою ЗВТ та поняття калібрування згідно [12], [68] відповідає визначенню калібрування, приведеному в [61-62]. Стає зрозуміло і що таке “непевність результатів калібрування”: при калібруванні ми визначаємо дійсні значення характеристик, в тому числі і похибок ЗВТ, шляхом вимірювань, а їх результатам притаманна непевність.

Що ж дає калібрування? На рис.2.6 рожевим показані межі допустимої похибки ЗВТ $\pm \Delta_{\text{доп}}$. При повірці підтверджується знаходження похибки ЗВТ в межах $\pm \Delta_{\text{доп}}$. Коли межі довірчого інтервалу (червоний пунктир) вужчі, ніж $\pm \Delta_{\text{доп}}$, то калібрування дає можливість зменшити похибку вимірювань, за допомогою внесення поправок.

Приклади процедур калібрування.

Приклад 1. Калібрування дозиметра.

Дозиметр призначений для вимірювання еквівалентної дози нейтронів. Прилад складається з АЦП (вторинний), комп'ютерного компонента та іонізаційної камери (основного вимірювального перетворювача). Іонізаційна камера перетворює значення потоку нейтронів N в електричний струм $I = \alpha N$. АЦП перетворює значення струму I в стандартний цифровий код $C = \beta I$. Обчислювальний компонент за відомими значеннями коефіцієнтів α і β обчислює еквівалентну дозу нейтронів $N = C/\alpha\beta$. Похибка коефіцієнта β - незначна, а похибка іонізаційної камери за чутливістю $\Delta\alpha \pm (15-20)\%$. Остання визначає похибку ЗВТ; це значення $\Delta\alpha$ зумовлене розкидом параметрів іонізаційних камер при їх виготовленні. Дана похибка притаманна зразкам іонізаційних камер. Доцільно встановити чутливість їх проведенням індивідуального калібрування, що дає змогу зменшити похибку в кілька разів.

Приклад 2. Калібрування ЗВТ у робочих умовах використання.

Матеріали зважують для різноманітних цілей обліку матеріалів. Зважування проводиться в ящику відповідно до потреб роботи з матеріалами. Електродвигун і витяжна вентиляція працюють одночасно. Реальна похибка зважування в 3-4 рази перевищує значення, отримане під час випробувань ваг і підтверджене під час повірки ваг через повітряні потоки та вібрації (тестування та повірка проводяться в ідеальних умовах, де немає потоку повітря та вібрації). При калібруванні ваг під час роботи використання ваг дозволяє точно оцінити особливості похибки зважування.

Наведені приклади свідчать про те, що калібрування в його розумінні як визначення дійсних значень M_X ЗВТ необхідне - в першому випадку

калібрування дозволяє зменшити похибку вимірювань, а у другому - оцінити реальну похибку, яка виявляється більшою за паспортну.

На противагу повірки, калібрують не тільки ЗВТ, а й еталони та додаткове устаткування, причому в нормальних та робочих умовах використання. Калібрувальна характеристика подається, як номінальна або індивідуальна. Також приводиться непевність отриманих результатів [64, 72].

2.3.3. Передавання розміру одиниці вимірювання за допомогою еталонних іонізаційних камер

Передавання розміру одиниці вимірювання за допомогою еталонних камер або калібрування дозиметрів [1-2,5-6] з допомогою устаткування типу УПД — Інтер доцільне за умови, що воно проводиться для енергетично скомпенсованих ЗВТ, оскільки різна їх енергетична залежність і відмінний вплив супутніх випромінень може призвести до значних розбіжностей покази каліброваних дозиметрів.

Як наслідок, для передавання розміру одиниці випромінювання калібрування здійснюють методом групового компаратора. Проте, таким чином допускається калібрування тих типів ЗВТ, для перевірки яких еталонне устаткування відкаліброване попередньо.

Метрологічну перевірку чи калібрування дозиметрів в колімованому пучку гамма-випромінення можливо здійснювати також на універсальних установках типу УПГД (рис.2.7). Існує обмеження за відстанню калібрування в установці, позаяк, починаючи з певної відстані від джерела, внесок розсіяного випромінювання в потужність дози стає неістотним порівняно із внеском прямого пучка випромінювання. На цих відстанях вже діє закон обернених квадратів щодо інтенсивності опромінення, тому стає можливим проведення перевірки будь-яких типів дозиметрів гамма-випромінювання.



Рисунок 2.7. Установа з колімованою геометрією типу УПГД

Якщо поглянемо на спектр рис.2.8, то ми побачимо, що він доволі схожий на спектр ^{137}Cs від точкового джерела, вплив розсіяного випромінювання - незначний, а відношення інтенсивностей «пік / комптом» стає задовільним. Даний спектр отриманий при калібрування гамма – детектора CsI на установці УПГД — 2.

По своїй конструкції устаткування типу УПГД відповідають вимогам [4,76-80] та за допомогою цього устаткування можна здійснювати калібрування майже всіх типів ЗВТ. Зазвичай при калібруванні дозиметрів гамма - випромінювання застосовують декілька ДІВ (3-4) активністю до 10^{11} Бк. Остання забезпечує перевірку дозиметрів в діапазоні потужностей доз до 50 мГр/год (на відстані 1 метр від ДІВ). Відзначу, що у багатьох приладів діапазон вимірювання досягає 10 Гр/год. Індивідуальні дозиметри для поточного та аварійного контролю, що застосовуються на радіаційно-небезпечних об'єктах, характеризуються діапазоном до 10 Зв (10 Гр), тому при перевірці їх або при калібруванні в діапазоні вимірювання їх слід опромінювати до 160 годин.

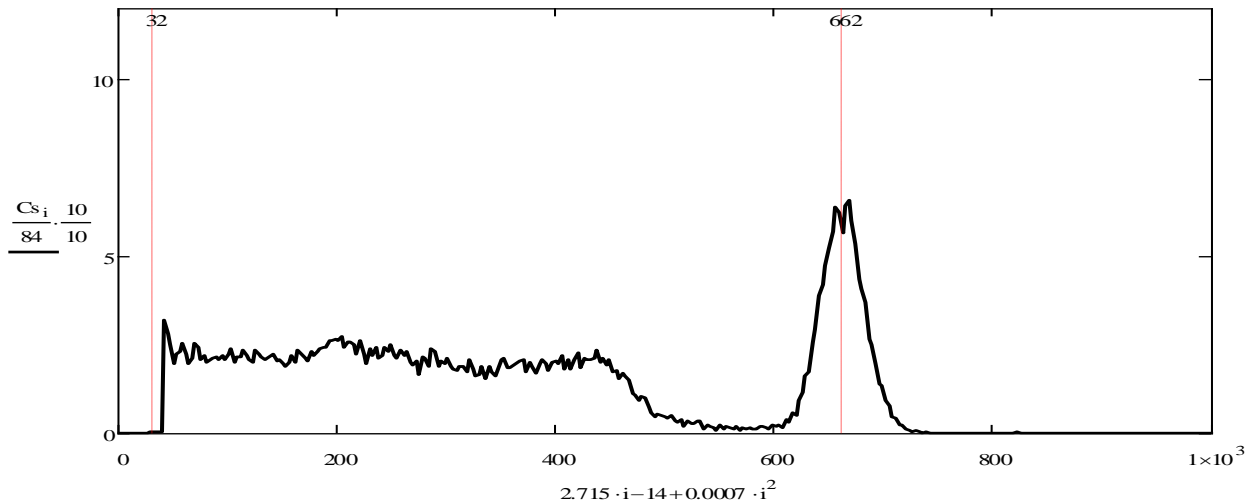


Рисунок 2.8. Апаратурний відгук спектру гамма – детектора CsI із ^{137}Cs (сталева капсула) еталонного устаткування типу УПГД-2.

Правила зберігання ДІВ для установках типу УПГД, регламентують використання для цього настінних сейфів. При проведенні повірки дозиметрів дістаються з сейфа і встановлюються в коліматор устаткування вручну або за допомогою ручного захоплення і таким же чином повертаються в сейф. Дана операція повторюється кілька разів при проведенні повірки одного широкодіапазонного дозиметра. При проведенні операції по завантаженню і вивантаженню джерел існує ймовірність втрати джерела і опромінення персоналу. Іншою проблемою в метрологічному забезпеченні дозиметрії гамма-випромінювання є те, що метрологічні організації потребують устаткування, що забезпечують більш широкий діапазон переданих потужностей доз, ніж устаткування УПГД. Особливо це стосується повірки дводіапазонних дозиметрів гамма-випромінювання. Відповідно вони мають 2 детектори: чутливий і грубий. Перевірку здійснюють лише на чутливому піддіапазоні, а у грубому - перевіряють працездатність детектора на початку піддіапазону.

Значна частина проблем, що обмежують застосування рентгенівського устаткування для перевірки дозиметрів, зумовлені нестабільністю рентгенівської трубки і суцільним спектром рентгенівського випромінювання. Якщо проблема нестабільності вирішується за допомогою еталонного дозиметра, то вирішення другої проблеми - значно складніше.

2.4. Методика калібрування. Дозиметри, вимірювачі потужності дози гамма- та рентгенівського випромінювання

Розроблена у процесі виконання роботи методика визначає порядок проведення, зміст і об'єм робіт по виконанню калібрування ЗВТ ІВ в стандартних полях рентгенівського та гамма-випромінювання згідно із [4-6, 80]. Вона поширюється на дозиметри, радіометри та вимірювачі дози, які призначені для використання в моніторингу полів стандартного рентгенівського та гамма – випромінювання [78-79]. При цьому, нормативні документи та документи системи якості вказані у [1-2,12,32].

2.4.1. Метод калібрування та специфікація вимог

Дозиметри, які призначені для вимірювання амбієнтного еквівалента дози, керми в повітрі, поглиненої дози, експозиційної дози (далі - дози) та потужності амбієнтного еквіваленту дози, потужності керми в повітрі, потужності поглиненої дози, потужності експозиційної дози (далі - потужності дози) гамма – та рентгенівського випромінювання калібрують наступними методами [6,80-82]:

- звіряння еталона та дозиметра, що калібрують, в стандартних полях гамма- та рентгенівського випромінювання;
- прямі вимірювання у відомому полі гамма-випромінювання.

Дозиметри, призначені для вимірювання індивідуального еквівалента дози гамма- та рентгенівського випромінювання, калібрують відповідно до п.3.1 та на плоскопаралельному водному фантомі із зовнішніми розмірами 30 см × 30 см × 15 см. Калібрування можна проводити не лише на водному пластиковому ISO-фантомі, але й у вільному повітрі. Калібрування на фантомі є переважним, якщо дозиметр дуже чутливий до зворотно розсіяного випромінювання [83-86].

2.4.2. Метрологічні характеристики каліброваних дозиметрів.

Значення діапазонів фізичних величин та розширеної непевності результатів калібрування наведені в Табл.2.3.

Таблиця 2.3. Характеристики калібрування

№ п/п	Вимірювана величина	Метод калібрування	Діапазон вимірювань	Розширена непевність, U, % при $k=2$, $P=0.95$
1	Амбієнтний еквівалент дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Зв до 5×10^5 Зв	(5,5 - 10) %
2	Індивідуальний еквівалент дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Зв до 5×10^5 Зв	(5,5 - 10) %
3	Керма в повітрі або поглинена доза гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Гр до 5×10^5 Гр	(4,0 - 10) %
4	Експозиційна доза гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-5} Р до 5×10^7 Р	(4,0 - 10) %
5	Потужність амбієнтного еквіваленту дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Зв/с до 50 Зв/с	(5,5 - 10) %
6	Потужність індивідуального еквіваленту дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Зв/с до 50 Зв/с	(5,5 - 10) %
7	Потужність керми в повітрі або потужність поглиненої дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Гр/с до 50 Гр/с	(4,0 - 10) %

8	Потужність експозиційної дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-8} Р/с до 5×10^3 Р/с	(4,0 - 10) %
---	--	-------------------------------------	---	--------------

Під час калібрування проводяться такі процедури: зовнішній огляд, випробування, оцінка невизначеності калібрування, визначення лінійної калібрувальної характеристики, визначення калібрувального коефіцієнта або чутливості в кожній точці калібрування (вимірювання) та реєстрація результатів.

Для забезпечення процедури калібрування одночасно використовується еталонне та допоміжне обладнання. Ці прилади повинні мати необхідні сертифікати калібрування (сертифікати) та/або сертифікати повірки. Їх метрологічні характеристики наведені в Табл.2.4.

Таблиця 2.4. Еталони, допоміжне обладнання для калібрування дозиметрів та їх метрологічні характеристики

Назва та умовне позначення еталонів, допоміжного обладнання	Заводський номер	Метрологічні характеристики	Розширена непевність
Вторинний еталон одиниць експозиційної дози, потужності експозиційної дози гамма-випромінення ВЕТУ 12-08-01-98	№ 03	Діапазон вимірювання потужності експозиційної дози від 0,05 мР/год до 7082 мР/год Діапазон вимірювання експозиційної дози від 5×10^{-5} Р до 50 Р	$U = 3,0$ % ($k = 2$, $P = 0,95$)
Установка повірочна гамма-дозиметрична УПГД-2 (РЕТУ 12-06-02-02)	№ 03	Діапазон потужності амбієнтного та індивідуального еквіваленту дози від 0,8 мкЗв/год до 210 мЗв/год	$U = (5,0 - 8,0)$ % ($k = 2$, $P = 0,95$)
Установка повірочна УПГД-2 з двома джерелами з	№ 03, № ČS 6065, № ČS 7494	Діапазон потужності експозиційної дози від $7,0 \times 10^{-4}$ Р/год	$U = 4,0$ % ($k = 2$, $P = 0,95$)

радіонуклідом радій-226 типу ЕР9 та ЕР8		до $2,3 \times 10^{-2}$ Р/год	
Дозиметр універсальний ДКС-АТ5350/1 з іонізаційною камерою типу ТМ 30013, типу ТМ 23342 (РЕТУ 12-05/06- 15)	№ 10543, № 04587, № 1600	Потужність керми в повітрі рентгенівського випромінення від $4,4 \times 10^{-3}$ Гр/хв до 3×10^3 Гр/хв; керма в повітрі рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-5}$ Гр до 5×10^5 Гр	U = 3,0 % (k = 2, P = 0,95)
		потужність амбієнтного еквівалента дози рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-4}$ Зв/хв до 3×10^3 Зв/хв; амбієнтний еквівалент дози рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-5}$ Зв до 5×10^5 Зв	U = 5,0 % (k = 2, P = 0,95)
Дозиметр ДКС-АТ5350/1 з іонізаційними камерами типу ТМ 30013, типу ТМ 32002	№ 10543, № 0458, № 00353	Камера типу ТМ 30013: Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення цезій-137 $5,010 \times 10^7$ Гр/Кл Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення кобальт-60 $4,962 \times 10^7$ Гр/Кл Камера типу ТМ 32002: Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення цезій- 137 $2,508 \times 10^4$ Гр/Кл Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення кобальт-60 $2,484 \times 10^4$ Гр/Кл	U = 3,0 % (k = 2, P = 0,95)
Комплекс рентгенівський універсальний серії RoSHER-K (компаратор)	№ 13-02- 15-25	Енергетичний діапазон від 48 кеВ до 79 кеВ	U = 3,0 % (k = 2, P = 0,95)

Установка рентгенівська РУМ-21М (компаратор)	№ 75	Енергетичний діапазон від 8 до 33 кеВ	$U=(3,0-5,0)$ % ($k=2$, $P=0,95$)
Дозиметр рентгенівського та гамма-випромінення ДКС-АТ1123	№ 51778	Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози від 50×10^{-9} Зв/год до 10 Зв/год	$U = 8,0$ % ($k = 2$, $P =$ $0,95$)
Секундомір-таймер електронний HS45	№ 1	Діапазон вимірювання від 0 с до 3600 с	$U = (0,02-$ $0,04)$ с ($k = 2$, $P =$ $0,95$)
Гігрометр психрометричний ВИТ-1	A412	Діапазон вимірювання від 0 °С до 25 °С	$U = (0,14-$ $0,19)$ °С ($k = 2$, $P =$ $0,95$)
Гігрометр психрометричний ВИТ-2	A792	Діапазон вимірювання від 16 °С до 40 °С	$U = (0,06-$ $0,09)$ °С ($k = 2$, $P =$ $0,95$)
Рулетка вимірювальна металева Р5 УЗК	№ 3	Номінальна довжина 5 м, ціна поділки шкали 1,0 мм	$U=(0,6 -$ $0,7)$ мм ($k = 2$, $P =$ $0,95$)
Кутомір з цифровим відліковим пристроєм типу 360°-0,1°-Ц	№ 703004	Діапазон кутової частини від 0 ° до 360 °	$U = 0,2$ ° ($k = 2$, $P =$ $0,95$)
Барометр-анероїд контрольний тип БАММ-1	3214	Діапазон вимірювання атмосферного тиску від 94.66 кПа до 104.00 кПа	$U = (0,021 -$ $0,089)$ кПа ($k = 2$, $P =$ $0,95$)
Водяний фантом		Габаритні розміри 30см × 30см × 15см	Не нормуєтьс я

Допускається використовувати інші еталони та допоміжне обладнання, якщо їх МХ не гірші за МХ, зазначених у Табл. 2.4.

2.4.3. Порядок проведення вимірювань.

У полі колімованого пучка випромінювання на деякій відстані від джерела в площині, перпендикулярній до напрямку поширення пучка, розміщують детектор еталонного дозиметричного приладу і вимірюють потужність дози по двох взаємно перпендикулярних осях в площині перетину пучка не менше ніж в семи рівномірно розподілених точках. В кожній i точці виконують не менше п'яти вимірювань, визначають їх середньоарифметичні значення \bar{X}_i і відхилення α_i в процентах від середньоарифметичного значення потужності дози \bar{H} в геометричному центрі поля:

$$\alpha_i = \frac{\bar{X}_i - \bar{H}}{\bar{H}} \quad (2.1)$$

Поле випромінювання вважається рівномірним в області, де відхилення α_i не перевищує $\pm 5\%$. Якщо ця умова для крайніх обраних точок не виконується, слід перевіряти його для точок, розташованих ближче до центру пучка устаткування, до тих пір, поки не будуть знайдені точки, що лежать на границі зони рівномірного поля.

На еталонні устаткування, що реалізують метод подібності та еквівалентного поля, а також на устаткування без типового вузла колімації вимоги до рівномірності поля не поширюються [4, 56].

Визначення дози (потужності дози).

- Прямі вимірювання за допомогою еталонного дозиметра.

Модельне рівняння визначення дози (потужності дози):

$$H = h \times N_{ref} \times H_{ref} \times k_r \times k_t \quad (2.2)$$

де H – значення дози (потужності дози) устаткування, що калібрується; H_{ref} – еталонне значення (покази еталонного дозиметра); N_{ref} – коефіцієнт

калібрування еталонного приладу; k_r – коригуючий коефіцієнт до відстані; k_t – коригуючий коефіцієнт на час опромінення; h - коефіцієнт перетворення (керми в еквівалент дози, амбієнтного еквіваленту дози в індивідуальний еквівалент дози тощо) [87-89]. Значення h наведено в [6,61].

Коефіцієнт перетворення використовують, якщо еталонний дозиметр вимірює подібну величину до основної. Якщо еталонний дозиметр прямо вимірює основну величину, то коефіцієнт перетворення дорівнює одиниці. Коефіцієнт k_t використовується лише для вимірювання дози.

- Звіряння за допомогою компаратора (групового компаратора) з еталонною гамма-установкою.

Визначення дози (потужності дози) в полі фотонного випромінення проводять методом звіряння з еталонними дозиметричними установками за допомогою компаратора. Як компаратор використовують іонізаційні камери еталонних дозиметрів. При звірянні устаткування іонізаційну камеру розміщують в точки поля фотонного випромінення еталонної устаткування, і реєструють покази компаратора не менше десяти разів в кожній точці. Визначають середньоарифметичне значення $\overline{X_{refl}}$, в кожній точці. Потім цю ж іонізаційну камеру розміщують в аналогічні точки устаткування (по відстані градуовальної лінійки, по потужності джерел, по якості випромінення (енергії) тощо), що калібрують, реєструють покази компаратора (не менше десяти значень в кожній точці) і визначають середньоарифметичне значення \overline{X}_l .

Для визначення дози (потужності дози) можна використовувати груповий компаратор, що складається з групи однотипних робочих дозиметричних приладів. Число приладів, які калібрують, визначають непевністю устаткування і, як правило, воно дорівнює від 3 до 12. Спочатку прилади, що входять до складу групового компаратора, перевіряють на еталонних установках. Потім кожен калібрований прилад встановлюють у робочу точку поля устаткування. Знімають по одному значенню кожного приладу. Середньоарифметичне значення показів всіх приладів приймають за дійсне значення потужності дози в даній точці поля фотонного випромінювання. Вимірювання потужності дози повторюють для всіх робочих точок.

Модельне рівняння визначення дози (потужності дози) є наступним:

$$H = \frac{H_{ref} \times X \times k_r \times k_t}{X_{ref} \times k_{refr} \times k_{refl} \times k_{refT}} \quad , \quad (2.3)$$

де k_{refT} - коригуючий коефіцієнт на розпад еталонного джерела. Коефіцієнт k_t , k_{refl} використовуються лише для вимірювання дози.

- Для устаткування, в яких застосовується метод подібності з фільтрами різної кратності ослаблення випромінювання, визначають кратність ослаблення фільтрів.

Визначення інтервалу робочих відстаней.

Для устаткування із використанням колімованого (або неколімованого) пучка фотонного випромінювання та градуїної лінійки дотримання закону квадратів відстаней перевіряють при визначенні діапазону робочих відстаней, на яких можна встановлювати дозиметричні прилади [1,4]. Використовуючи еталонну дозиметричну апаратуру, метод прямих вимірювань використовується для підтвердження відповідності закону квадрата відстаней. Для цього детектор розташовують у полі так, щоб його центр був відсічений поздовжньою віссю пучка випромінювання. При цьому максимальні лінійні розміри детектора повинні бути не більше 1/2 мінімального лінійного розміру поперечного перерізу пучка. Потужність дози вимірюють в п'яти - шести точках, рівномірно розподілених уздовж градуювальної лінійки. У кожній точці проводять не менше п'яти вимірювань і визначають їх середньоарифметичне значення. Добуток середньоарифметичного значення потужності дози \bar{X}_i в i -й робочій точці на квадрат відповідної відстані від центру активної частини джерела випромінювання до ефективного центру детектора r_i має бути постійним з урахуванням ослаблення випромінювання в повітрі і розраховуватися за формулою:

$$C_i = \bar{X}_i \times r_i^2 \times e^{\mu \times r_i} \quad , \quad (2.4)$$

де μ - лінійний коефіцієнт ослаблення випромінення в повітрі, м^{-1}
Розкид значень C_i отриманих в крайніх точках градувальної лінійки, не повинен перевищувати 5%. Інтервал градувальної лінійки устаткування, в якому виконується закон квадратів відстаней, є інтервалом робочих відстаней устаткування.

Висновки до розділу 2

1. Вивчено методологію вимірювань характеристик дозиметричних величин, методи і засоби вимірювань, а також стандартні характеристики рентгенівського та гамма- випромінювання, що залежать від низки конструктивних параметрів устаткування, призначеного для перенесення розміру одиниці - від еталону до конкретного ЗВТ, від розміщення каліброваних ЗВТ у зоні опромінення та від низки чинників впливу (Додаток 2).
2. На підставі отриманих результатів досліджень послідовно розглядаються методи створення (формування) стандартних характеристик рентгенівського та гамма- випромінювання, адже саме від них залежить точність передавання розміру одиниці випромінення.
3. Оскільки калібровані ЗВТ у різних партіях можуть перекривати області застосування, що істотно відрізняються, то і методи формування стандартних характеристик випромінювання та устаткування, що їх реалізують, є різними. Зокрема, у спеціалізованій лабораторії ДП «Київоблстандартметрологія» експлуатуються три види устаткування для передавання розміру одиниці випромінювання.
4. Детально аналізуються, за результатами попередніх досліджень, наявні процедури калібрування ЗВТ рентгенівського та гамма- випромінювання. Результати аналізу сприяють їх вдосконаленню та покращенню метрологічних параметрів калібрування ЗВТ.
5. На цій основі запропоновано оновлення методики калібрування дозиметрів та вимірювачів потужності дози гамма- та рентгенівського випромінювання.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАЛОНІВ ДОЗИМЕТРИЧНИХ ОДИНИЦЬ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ

Головною ланкою системи метрологічного забезпечення країни є еталонна база, стан якої визначає рівень розвитку техніки та забезпечує єдність вимірів у всіх галузях народного господарства. Тому основна робота державних метрологічних центрів в галузі вимірювань дозиметричних величин рентгенівського та гамма-випромінювань - спрямована не тільки на створення, удосконалення та переоснащення первинних еталонів, а й на створення робочих еталонів. Зростаючі потреби народного господарства у високоточних засобах вимірювань накладають особливу відповідальність на працівників державної метрологічної служби.

3.1. Вивчення правил та стратегії формування вибірки каліброваних засобів, а також видів вибірок

Вивчення і наступний аналіз метрологічних заходів стосовно виробництва автодеталей (приладів) базується [40] на потребі узгодження розміру партій вибірки зі значеннями ризику (економічного та метрологічного). Розроблено, зокрема, стратегію формування вибірки, метою якої є встановлення коректних кроків погодження стратегії відбору зразків із можливостями метрологічних інструментів, фіксування зайвих метрологічних інструментів і вимірювань, вивчення на цій основі можливості зменшення ризиків.

Підприємства-виробники ЗВТ ІВ забезпечують періодичну перевірку кожного зразка продукції при виготовленні з допомогою певного виду метрологічному контролю. Метрологічна команда складається з 2-3 осіб, що використовують 4 автономні інструменти метрологічного контролю, 2 інструменти виявлення забруднень, частинок, подряпин, неякісного ущільнення, тощо), 2 види засобів для захисту об'єктів; 1 вбудований інструмент метрології (для електронно-паперових міток); всього 9 засобів.

3.1.1. Алгоритм відбору та диспетчеризації вибірок. Метрологічні підходи

Тому дослідимо підхід, що дає змогу оцінити коректність вибірки ЗВТ, диспетчеризацію вибірок у часі з тим, щоби метрологічні операції не призвели до часових затримок. Цей підхід раніше призначався автовиробництву, як галузі з істотним ризиком кінцевого споживача [40] і зосереджував увагу винятково на часі черги і тривалості вимірювання з використанням метрологічних засобів. У даній роботі використано зазначений підхід для мінімізації метрологічних ризиків (економічні ризики порахувати значно важче, оскільки кінцевий споживач переважно невідомий) стосовно ЗВТ ІВ.

Оцінимо види диспетчеризації партій ЗВТ:

FIFO: Перша партія ЗВТ опрацьовується першою.

LIFO: Остання партія, опрацьовується першою.

Пріоритетний порядок: Партії, що поступали, виносяться на перевірку згідно раніше передбаченого порядку.

Оцінимо можливість введення додаткового кроку з метою кращого використання метрології та зниження ризиків, використовуючи змінений відбір зразків [91]. Так пропонується динамічний метод, який залучається для управління чергами і для обирання конкретних партій ЗВТ для калібрування.

Вибір прийнятного методу здійснюється за наступними критеріями:

- А) Оцінка наявності простору для партій виробів, які чекають на калібрування;
- Б) Оцінка наявності ресурсів, необхідні для впровадження: устаткування, часу, тощо;
- В) Оцінка на основі очікуваних результатів (ризиків).

Методи впорядковуються за критерієм - від найкращого коефіцієнту (значення 1) до найгіршого (значення 5). При цьому, метод з найменшим сумарним значенням коефіцієнту оцінки вважається найкращим (Див. Табл.3.1).

Таблиця 3.1. Оцінка методів організації вибірки ЗВТ для калібрування

Метод	Простір	Ресурси	Результат	Коефіцієнт оцінки
FIFO	3	1	3	2,33
LIFO	3	1	4	2,67
Пріоритетний порядок	2	2	2	2,00 (усереднений)
Інший порядок (динамічний метод)	1	3	1	1,67
-за видом ЗВТ	1	3	1	1.67
-за потенційно неякісними складовими ЗВТ (по групах)	1	1	1	1.00
-за конкретним виконавцем	1	2	1	1.33

Як наслідок, з оцінкою вузьких місць, а саме пропускної спроможності еталонного устаткування та максимально допустимої дози опромінення персоналу при калібруванні пропонується метод, відмінний від раніше використовуваного. Основою даного методу є зміни значень метрологічного ризику ЗВТ@R внаслідок впровадження метрологічних заходів. Це досягається, як показали проведені дослідження шляхом оптимізації заповнення внутрішнього простору еталонного устаткування і, тим самим, зменшення тривалості черг на обслуговування.

При цьому, такий метрологічний захід, такий як дослідження розмірно-якісних параметрів еталонного устаткування, не несе корисної метрологічно-обґрунтованої інформації, так як не знижує ЗВТ@R). Ввівши операцію входної перевірки ЗВТ методом перевірки інтенсивності радіаційного фону, можемо зменшити час очікування, тобто чергу.

За допомогою запропонованого способу перевірка ЗВТ ІВ з певної партії конкретного виробника займає найменшу кількість часу та є простою. Цей період

часу враховується в попередньому стандарті «Час обробки». У цьому випадку окрема перевірка продуктивності додається до традиційної технології майже на початку піддіапазону.

Після закінчення процесу калібрування дозиметра повторюють ідентичні досліди на зразках тієї ж партії. Завершення процедури калібрування та зниження метрологічних ризиків вважаються такими, що відбулися, коли є помітні зміни характеристик, що виходять за межі середньостатистичних даних.

У результаті, коли поточна вибірка підлягає дослідженням, зростає значення $ZVT@R$. Вони збільшується пропорційно кількості ЗВТ ІВ, що чекають на зазначений метрологічний захід. Пізніше починається операція калібрування, яка займає певний час. У цей момент значення $ZVT@R$ спадає на стільки, скільки зразків ЗВТ підлягають паралельному калібруванню. Кінцеве значення $ZVT@R$ - це різниця між $ZVT@R$, зменшеним в результаті введеної виміральної перевірки, і поточним значенням $ZVT@R$, збільшеним внаслідок того, що технологічне устаткування виготовляє наступну партію ЗВТ.

Отже, рекомендується введення 2-х часів для аналізу рівня метрологічних ризиків $ZVT@R$: час калібрування для прикладу та час очікування партії у черзі на калібрування.

Ми візьмемо до уваги процес оцінки відбору та стану зразка ЗВТ та можливість зміни стратегії цього зразка з метою пошуку можливостей покращення якості об'єктів контролю за результатами метрологічних заходів за наявності кількох одиниці довідкової апаратури. Щоб підтвердити точність використаної моделі вибірки, рекомендований підхід слід використовувати неодноразово. Основні етапи цього процесу наступні (рис. 1):

1. Уточнення характеристик еталонного устаткування.
2. Вивчення зв'язку між даним видом еталонного устаткування та перевірюваними ЗВТ.
3. Виявлення вузьких місць запропонованої технології для її покращення.
4. За встановленої стратегії вибірки, аналізування можливостей нової стратегії та розрахунок нових коефіцієнтів вибірки.

5. Висновок, чи достатньо запропонованих заходів для збереження наявної технології вибраних партій ЗВТ (рис.3.1) (шлях 5 - 3) чи слід змінювати дану технологію (шлях 5 -1-2- 3).

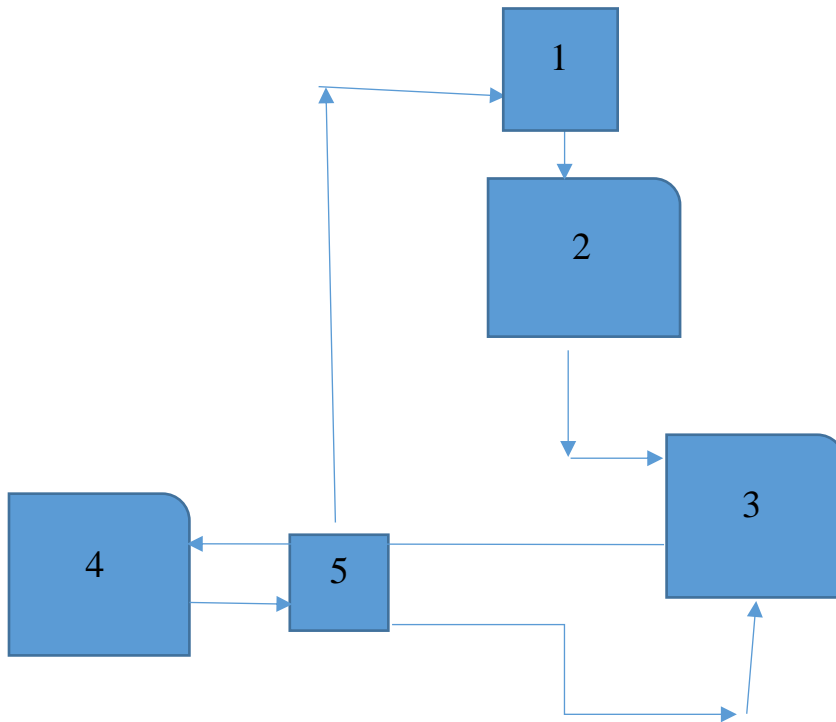


Рисунок 3.1. Технології формування і оцінювання вибірки ЗВТ

Підкреслимо, що третій етап на цій діаграмі відповідає за вибір відповідних показників та оцінку ймовірності їх покращення. Наявна вибірка залишається незмінною, якщо показники достатньо високої якості. Якщо ні, ми переходимо до четвертого етапу, який вводить новий метод вибору об'єктів. Щоб згодом визначити, як змінився процес у результаті внесених модифікацій, життєво важливо дослідити і ознайомитися з показниками якості до внесення змін до техніки відбору. Значення ЗВТ@R для технологічного обладнання виробничої лінії, загальна ефективність обладнання, довжина циклу, вихід кабелів тощо можуть бути використані як ознаки зміни в цій ситуації.

Існуюча система диспетчеризації пакетів досліджується з метою потенційних змін, якщо її неможливо покращити, наприклад, шляхом зміни значень частоти вибірки або техніки вибірки. Якщо стратегія вибірки зберігається, створюється модель для оцінки її продуктивності, що дозволяє

постійно перевіряти точність методу. Критеріями одночасно є очікування отриманих результатів і, принаймні, незмінні або підвищені значення ЗВТ@R технологічної лінії.

На додаток до значень ЗВТ@R, необхідно оцінити ще два важливі показники ефективності — мінливість ризику та зміну тривалості циклу — які показують, чи відбулося покращення зі зміною техніки вибірки. Навіть якщо не всі типи технологічного обладнання перейшли на новий стиль контролю, загальна мінливість ризику для деяких метрологічних вимірювань, вказана як стандартне відхилення отриманих значень, може знизитися від значень ЗВТ@R від 78 до 48.

Іншими словами, проведено ретельний аналіз метрологічних заходів на прикладі калібрування ЗВТ ІВ з урахуванням таких факторів: фізико-конструктивні характеристики компонентів ЗВТ, кількість використовуваних одиниць технологічного обладнання для їх калібрування, складності та кваліфікації виконання метрологічних заходів, типів і типів використовуваних метрологічних приладів, стратегії диспетчеризації партій, розміщення заходів у ЗВТ. Це дає змогу усвідомити ефективність метрологічних заходів як за важливими характеристиками, так і за обсягом обраних рішень, і встановити чи прийняті рішення можуть метрологічні й економічні ризики ЗВТ, як для її виробника, так і для ДП «Київоблстандартметрології».

У результаті вивчення комбінованих ризиків калібрування ЗВТ ІВ встановлено наступне:

- запроновані заходи ДП «Київоблстандартметрологія», як надавача метрологічних послуг – додаткові операції метрологічного контролю – суттєво підвищити метрологічну якість каліброваних ЗВТ і істотно знижують ризики кінцевих споживачів цих ЗВТ.
- запропоновано нову стратегію формування вибірки: підходи за ЗВТ базуються на змінних коефіцієнтах вибірки; підходи за еталонним устаткуванням - на постійних коефіцієнтах, оскільки устаткування може простоювати певний час без використання.

- Специфіка калібрування ЗВТ ІВ, номенклатура яких змінюється залежно від замовлення, запропоновано комбінований вибір зразків із врахуванням можливостей еталонного устаткування. Релевантно можна розглядати характеристики ЗВТ ІВ стосовно їх калібрування, пов'язуючи кількість ЗВТ для калібрування із продуктивністю еталонного устаткування.

Тим самим, пропонується стратегії змінної вибірки, для погодження чинних методів відбору ЗВТ ІВ із можливостями еталонного устаткування, оптимізації метрологічних і економічних ризиків виробництва, калібрування та експлуатації ЗВТ ІВ.

3.2. Особливості передавання розміру одиниць гамма- випромінювання для еталонних устаткування колімованої\неколімованої геометрії

На підставі аналізу перспектив розвитку народного господарства головними завданнями є:

1. метрологічне забезпечення атомної енергетики з урахуванням необхідності вдосконалення системи дозиметричного контролю на АЕС, контролю рівня випромінювань та охорони навколишнього середовища;
2. метрологічне забезпечення сировинної бази країни, що розвивається (застосування перспективних методів пошуку та розвідки корисних копалин за допомогою ядерно-геофізичних методів);
3. метрологічне забезпечення засобів променевої діагностики та терапії у медицині;
4. метрологічне забезпечення при застосуванні джерел іонізуючих випромінювань у новітніх технологічних процесах (засоби неруйнівного контролю, дефектоскопія тощо);
5. метрологічне забезпечення ГО;
6. удосконалення метрологічного забезпечення застосування радіоізотопних методів у сільському господарстві.

Виходячи з цього, виникла необхідність в модернізації еталонної бази ДП «Київоблстандартметрологія», як надавача послуг у галузі метрологічного забезпечення виробництва і експлуатації ЗВТ ІВ.

Вирішення поставленої проблеми покращення калібрування ЗВТ полягає у створенні і модернізації, в тому числі під вимоги Європейського Союзу, еталонного устаткування з ДІВ. Тому набуває сенсу проведення поглиблених досліджень, які включають калібрування ЗВТ на установках типу УПД — Інтер; щодо досліджень їх з різними типами детекторів, залучення різних методів калібрування еталонного устаткування та дозиметрів з їх допомогою. Таке устаткування в обов'язковому порядку підлягає калібруванню уповноваженими Державними службами, які видають відповідний документ (Табл.3.2 і Табл.3.3).

Калібрування устаткування УПД-ІНТЕР.

1. Операції калібрування.

При проведенні калібрування повинні виконуватися наступні операції:

Зовнішній огляд - відсутність механічних пошкоджень, слідів корозії, порушення покриттів. Наявність градуювальної лінійки та лічильника з ціною поділки не більше ніж 1 мм. Наявність підставок для приладів.

Відхилення від паралельності осі пучка площини градуювальної лінійки не повинно перевищувати 5 мм на 1000 мм - перевіряється шляхом зіставлення графіків однорідності поля по вертикалі на відстанях 600 та 1200 мм.

Центри однорідного в межах 5% поля повинні відрізнятися по висоті не більш ніж на 3-5 мм.

Похибка (непевність) фіксування блоків детектування не повинна перевищувати 0,2 % від відстані джерело-детектор - прилад (детектор) на підставці встановлюється на пересувному візку. Попередньо вимірюють відхилення центра детектора від вказівника відстані на візку. Візок з приладом (детектором) встановлюється на відстані 600 мм за вказівником візка. Знімаються покази лічильника на пульті керування. Сума (за абсолютною величиною) відхилення центра детектора від вказівника візка та різниці показів

лічильника та вказівника за градуовальною лінійкою не повинна перевищувати 1,5 мм.

Наявність експлуатаційної документації. Дозвіл на роботу з радіоактивними джерелами активністю до 60 Ки. Свідоцтво про попереднє калібрування (у випадку повторного калібрування) - перевіряється візуально.

Таблиця 3.2. Методика калібрування на установці УПД-ІНТЕР. Технічні вимоги

Що перевіряється, за допомогою якого приладу, інструменту. Методика калібрування.	Технічні вимоги
<p>Опробування.</p> <p>Методика викладена в розділі «Підготовка до роботи» інструкції по експлуатації.</p> <p>Визначення метрологічних характеристик:</p> <p>а) При вимірюваннях використовується камера малого об'єму від зразкового I розряду дозиметра ДРГ2-01 чи камера типу 70110 від зразкового I розряду дозиметра VA-J-18 (чи 27012).</p> <p>Камера встановлюється в підставці на пересувний візок послідовно на відстанях 600 та 1200 мм від джерела гамма-випромінення. Вимірюється значення ПЕД без фільтрів в площині перпендикулярній осі пучка по вертикалі та горизонталі через кожні 20 мм.</p>	<p>.</p> <p>Справність органів управління, системи сигналізації та блокування.</p> <p>Можливість встановлення детекторів в поле гамма-випромінювання.</p> <p>Можливість встановлення детекторів</p>

<p>б) Перевірка проводиться шляхом вимірювання ПЕД на відстанях 20, 30, 60, 80, 100, 120 мм від джерела гамма-випромінення за допомогою зразкових дозиметрів I розряду ДРГ2-01 з камерою малого об'єму чи VA-J-18 (27012) з камерою типу 70110. Відлік відстаней береться за лічильником на пульту.</p> <p>в) ПЕД вимірюється за допомогою зразкових I розряду дозиметрів типу ДРГ2-01; VA-J-18 чи 27012.</p> <p>На відстанях від 20 до 60 см від джерела вимірювання проводяться з камерами малого об'єму.</p> <p>На відстанях 70 см та далі вимірювання проводяться камерами великого об'єму.</p> <p>Вимірювання проводяться на відстанях та з комбінаціями фільтрів, які відмічені знаком «+» в табл. 4. ПЕД.</p> <p>В кожній точці проводиться не менше 5 вимірювань, середні арифметичні значення записують в табл. 4 ПЕД.</p> <p>Основна похибка δ_0 вираховують за формулою (1):</p> $\delta_0 = t \times \sqrt{\left(\frac{1}{3} \times \delta\right)^2 + S^2} \quad (1)$	<p>на задані відстані. Можливість управління затвором радіаційної головки та фільтрами.</p> <p>Розміри однорідного в межах 5% поля гамма-випромінення повинні бути на відстані 600 та 1200 мм від джерела гамма-випромінення не менше 220x180 та 435x345. Перша цифра – розмір поля по вертикалі, друга – по горизонталі.</p> <p>Основна похибка ПЕД повинна бути не більше:</p> <p>в діапазоні $1,8 \times 10^{-11} - 0,8 \times 10^{-9}$ А/кг ($0,25 \times 10^{-3} - 10^{-2}$ Р/год) – 7%</p> <p>в діапазоні $0,8 \times 10^{-9} - 2,5 \times 10^{-5}$ А/кг ($10^{-2} - 350$ Р/год) – 5%</p>
---	---

<p>де t – коефіцієнт Стьюдента для довірчої ймовірності 0,95 (при $n = 5$, $t = 2,78$);</p> <p>δ – відносна похибка зразкового дозиметра, яким проводились вимірювання, згідно свідоцтва;</p> <p>S – середнє квадратичне відхилення вираховують за формулою (2):</p> $S = \frac{1}{p} \times \sqrt{\frac{(\bar{P}-P_2)^2}{n \times (n-1)}} \quad (2)$ <p>де n – число вимірювань;</p> <p>\bar{P} – середнє квадратичне значення ПЕД;</p> <p>$n = 6$; $t = 2,45$;</p> <p>$n = 7$; $t = 2,31$;</p> <p>За результатами калібрування видається сертифікат калібрування.</p> <p>В сертифікат повинна входити таблиця значень ПЕД.</p> <p>Основні дані калібрування заносяться до паспорта.</p>	<p>Примітка. Дозволяється проводити вимірювання ПЕД в діапазоні $1,8 \times 10^{-11} - 0,8 \times 10^{-9}$ А/кг ($0,25 \times 10^{-3} - 10^{-2}$ Р/год) дозиметрами типу ДРГЗ-01; ДРГЗ-02; ДРГЗ-03; попередньо повіреними на установках I розряду (УПГД-1, УПГД-2) з похибкою не більше 5%.</p> <p>Допускається введення поправочних коефіцієнтів до повірених піддіапазонів.</p>
---	---

Таблиця 3.3. Просторові характеристики устаткування різними фільтрами

Комбінація фільтрів	Відстань до джерела, см								
	20	30	40	50	60	70	80	100	120
Без фільтра	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2		+	+	+	+	+	+	+	+
3			+	+	+	+	+	+	+
4				+	+	+	+	+	+
5					+	+	+	+	+
1+3					+	+	+	+	+
2+3					+	+	+	+	+
1+4					+	+	+	+	+
2+4					+	+	+	+	+
3+4					+	+	+	+	+
1+3+4					+	+	+	+	+
2+3+4					+	+	+	+	+
1+2+3+4					+	+	+	+	+

Окрім того, здійснено дослідження особливостей рентгенівського устаткування в комплексі з установками, укомплектованими ДІВ, для калібрування, верифікації і встановлення чутливості дозиметрів [1, 6, 80, 84-90]. Даному устаткуванню притаманні переваги щодо еталонного устаткування з ДІВ. Вони забезпечують кращу радіаційну безпеку при транспортуванні, монтажі та експлуатації, а за меншої вартості рентгенівське устаткування може покрити на 3 порядки вищий діапазон потужностей доз.

Блокам детектування дозиметрів притаманна нелінійна градувальна характеристика. За значних потужностей внаслідок наявності зони спрацювання за часом зростає мультиплікативна складова похибки.

У дозиметричних приладів верхня межа вимірювання досягає 10 Зв/год. Лінеаризація характеристики здійснюється введенням поправки на період спрацювання, що оцінюється:

$$X=K \times N \times (1-\tau \times N)^{-1}, \quad (3.1)$$

де X вимірюється, як приклад потужність керми гамма-випромінення в повітрі, Гр·с⁻¹; K - чутливість блоку; N - швидкість підрахунку імпульсів, імп·с⁻¹; τ - «мертвий час», с.

Для калібрування дозиметрів гамма-випромінення визначають згадану складову похибки, для чого необхідні ДІВ з потужністю дози на ~ 6-8 Зв/год. Методика роботи з еталонним устаткуванням типу УПГД та УПД-Інтер описана вище. Зокрема, наперед визначається чутливість до джерела гамма-випромінення ¹³⁷Cs в одній точці початку грубого піддіапазону, а потім на установці рентгенівського випромінення досліджується лінійність градуовальної характеристики у всьому діапазоні вимірювань [1, 61, 86].

3.2.1. Будова, склад та характеристики еталону

Еталон випромінювання складається з комплекту джерел гамма-випромінювання на нуклідах кобальту-60 і цезію-137, властивості яких були згадані раніше, а також типового коліматора УПГД-2 і компаратора. Еталонний набір джерел гамма-випромінювання складається саме з одного джерела америцію-241, п'яти джерел нуклідів кобальту-60, п'яти джерел нуклідів цезію-137 та п'яти джерел нуклідів кобальту-60. Вказаний набір джерел з радіонуклідами дозволяє перекривати діапазони за потужністю керми 10,00 Гр/год та за енергією 0,059-1,25 МеВ.

Активну частину джерел з радіонуклідів укладено в герметичні оболонки з нержавіючої сталі марки. Розміри джерел з радіонуклідів (діаметр та висота зовнішньої ампули з нержавіючої сталі) наведені у Табл.3.4.

Таблиця 3.4. Розміри джерел з радіонуклідів.

Найменування радіонукліда	Номер джерела	Зовнішні розміри	
		діаметр, мм	висота, мм
Кобальт-60	206	6	7
Цезій-137	087	8	12

Причому, при вимірюваннях джерела гамма-випромінювання застосовуються в типових утримувачах у пристрої колімації устаткування УПГД-2. Як компаратор використовується дозиметричний прилад типу ДКС-АТ5350 № 664 та дві камери VA-K-253 № 729 та VA-K-254 № 680. Характеристики устаткування УПГД-2, в тому числі просторові характеристики приведені нижче (рис.3.2-3.3).

Таблиця 3.5. Просторовий розподіл інтенсивності випромінювання устаткування УПГД-2

Радіус (см)	Вліво				Вправо				Вверх				Вниз			
	Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч			
	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}
0	924	923	924	924	925	924	924	924	924	924	924	924	924	924	923	924
2	925	923	924	924	925	924	924	925	924	923	923	923	925	923	924	924
4	922	923	925	924	923	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924
6	922	923	922	922	923	923	924	923	924	924	923	924	923	923	923	923
8	800	790	800	800	816	810	815	815	804	804	805	804	750	780	780	770

Радіус (см)	Вліво				Вправо				Вверх				Вниз			
	Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч			
	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}
0	221	222	222	222	223	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
4	222	223	223	223	221	222	221	221	223	223	223	223	221	221	222	221
8	222	224	222	222	222	222	224	222	221	221	222	221	222	222	222	222
12	221	222	222	222	223	222	222	222	222	221	221	221	222	222	22	222
16	190	189	189	189	200	200	190	200	200	190	190	190	200	180	190	190

Радіус (см)	Вліво				Вправо				Вверх				Вниз			
	Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч				Вимірювання мР/ч			
	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}	1	2	3	Р _{ср}
0	938	940	937	938	937	939	938	938	939	938	939	938	938	938	937	938
4	937	939	938	938	939	938	938	938	940	939	937	938	937	937	936	937
8	938	937	938	938	937	940	938	938	937	938	938	938	938	938	937	938
12	937	936	938	937	937	936	936	936	937	937	937	937	938	937	938	938
16	890	900	880	890	870	850	860	860	880	870	880	875	880	880	860	870

Примітка. Установа УПГД-2 зібрана в 1963 р. за типовими кресленнями. У 1965 р. зроблено заміну коліматора. При атестації та дослідженні устаткування у 1971 році визнана як зразкова установка першого розряду. В даний час вона є основною установкою в Україні, що забезпечує науково-дослідні роботи, калібрування гамма-джерел та метрологічну перевірку дозиметричної апаратури.

Перевірка приладів на всіх діапазонах потребує зміни інтенсивності гамма-випромінювання, для чого в установці передбачені такі можливості:

- а) змінювати ширину пучка гамма-променів шляхом застосування змінних діафрагм з діаметром 30 мм, 60 мм, 80 мм;
- б) змінювати потужність дози випромінювання шляхом зміни джерел та зміною відстані від детектора до джерела.

Дослідження устаткування

У цій роботі використовувалися;

Зразкові гамма-джерела набору ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am ;

Високоточні дозиметри типу ДКС-АТ 5350/1 та 27012;

барометр;

термометр.

Визначення відповідності параметрів устаткування метрологічним вимогам:

- перевірена правильність відліку відстані від центру гамма-джерела до геометричного центру дозиметра з точністю 1 мм;

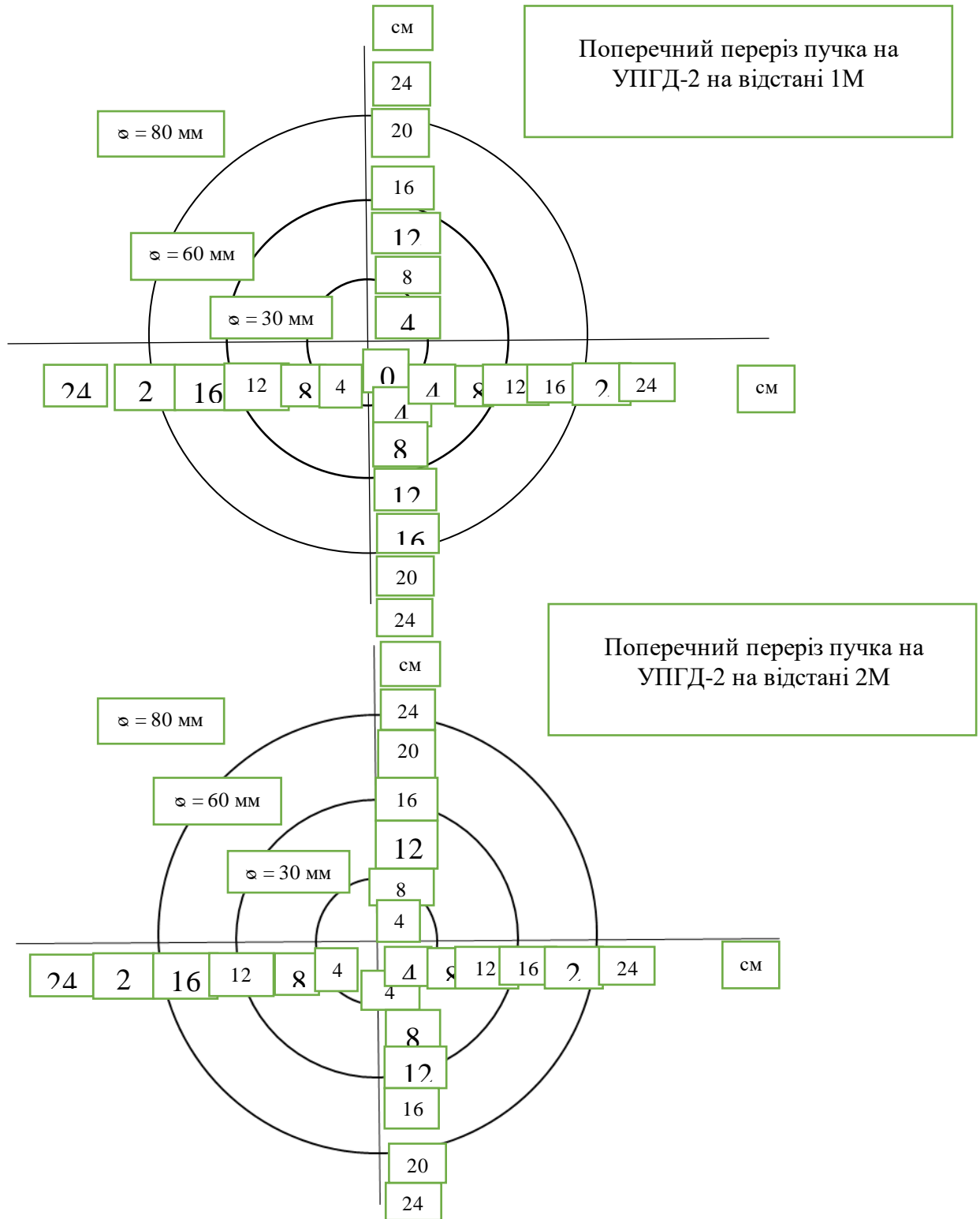


Рисунок 3.2. Поперечні перерізи пучка випромінювання устаткування УПГД-2

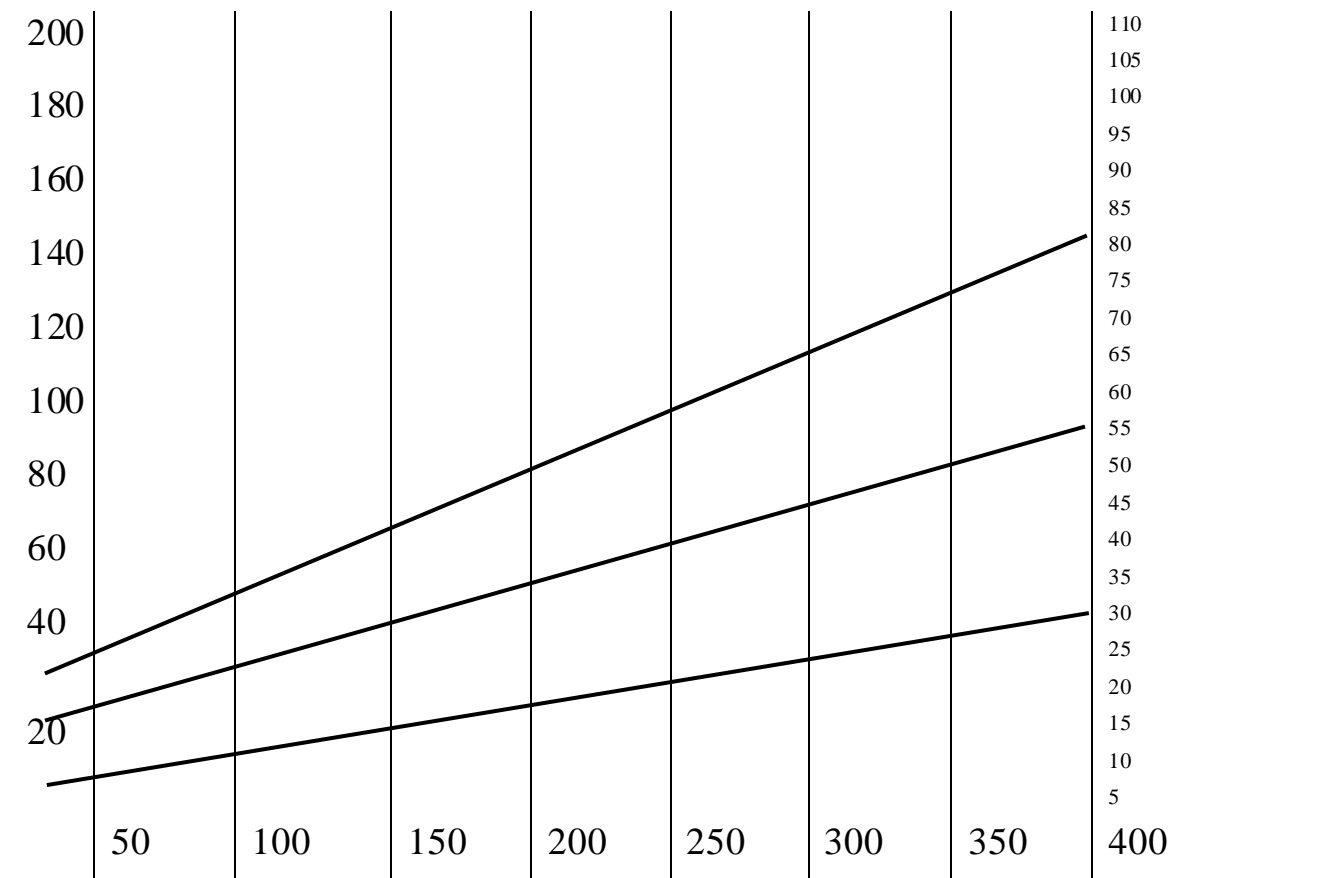


Рисунок 3.3. Інтенсивності пучка випромінювання устаткування УПГД-2 у перерізах

3.2.2. Результати дослідження зразка еталону

Розмір одиниці потужності керми в повітрі гамма-випромінювання передавався джерелам. Визначалася потужність керми від кожного джерела за умови проведення 5-6 серій вимірювань. Результати вимірювань наведені у Табл.3.6 (на 22 січня 2023 року).

Таблиця 3.6. Потужність керми від джерел випромінювання. Приклад

Найменування радіонукліда	Номер джерела	Потужність керми в повітрі, мГр/год
Цезій-137	001	55,0
Кобальт-60	206	0,332
Америцій-241	799	0,0228

Примітки:

1. При перерахуванні цих значень на інші дати слід користуватися значеннями періоду напіврозпаду для кобальту-60 - 1924,8 дня, для цезію-137 – 30,17 років.

2. Оцінка СКВ результатів вимірювань становить відповідно (0,6 - 1,0)% для довірчої ймовірності 0,95.

Дослідження компаратора показали, що нестабільність показів протягом 8 годин робочого дня не має перевищувати 0,5%, а дрейф нульової точки через 1 годину на найчутливішому діапазоні при включенні на "нуль" і температурі $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ не повинен перевищувати 0,3%.

Основною метрологічною характеристикою компаратора є нестабільність його показів протягом року. Остання перевіряється за допомогою контрольного джерела. Якщо нестабільність компаратора не перевищує зазначеної в паспорті, то можна використовувати компаратор для передачі розміру одиниці. Якщо нестабільність компаратора вища від зазначеної в паспорті, то передавати розмір одиниці з використанням цього компаратора не можна, і він повинен бути замінений.

У випадку успішного тестування вищевказаних характеристик, робочий еталон одиниць керми гамма-випромінювання вважається таким, що відповідає вимогам нормативних документів та подається до затвердження та використання.

3.3. Забезпечення функціонування робочих еталонів інтенсивності іонізуючого випромінювання

Проведено роботи із забезпечення функціонування робочих еталонів, які включають метрологічні дослідження як самих робочих еталонів, так і ланок передачі розміру одиниць і зразкових засобів вимірювання.

Роботи із дослідження та застосування робочих еталонів, проведені в період 2018 -2023 роки, знайшли конкретне застосування в Україні при точних вимірюваннях параметрів іонізуючого випромінювання в ядерній енергетиці, медицині та інших галузях шляхом перевірки та калібрування зразкових засобів вимірювань.

Проведення калібрування еталонних засобів вимірювання.

За звітний період для державних метрологічних центрів України та відомчих метрологічних служб галузей народного господарства України проведено:

- калібрування еталонних дозиметрів типу UNIDOS, 27012, M2300, ДКС-05 та інших;
- передачу розміру одиниць потужності керми в повітрі (потужності експозиційної дози) еталонним дозиметричним установкам методом прямих вимірювань та методом групового компаратора;
- калібрування еталонних дозиметричних устаткування типу УПГД-2 , "УПД-ІНТЕР" та гамма-джерел.

Калібрування дозиметричного устаткування УПГД-2.

Проведено калібрування еталонних дозиметричних устаткування типу УПГД-2, що належать ВП «Рівненська АЕС», ДСП «ЧАЕС», ВП «Південно-Українська АЕС». Мета роботи - визначення основних метрологічних параметрів дозиметричних устаткування, калібрування гамма-джерел, що входять до складу устаткування, як еталонів потужності керми (потужності експозиційної дози).

Результати калібрування еталонних дозиметричних устаткування УПГД-2

Операції калібрування:

- зовнішній огляд та випробування;
- визначення розмірів однорідного поля;
- перевірка дотримання закону обернених квадратів;
- визначення непевності устаткування;
- оформлення результатів калібрування.

Засоби вимірювань:

для проведення калібрування використано еталонний дозиметр типу ДКС-АТ 5350/1 з набором вільно-повітряних іонізаційних камер.

Умови калібрування.

У метрологічних лабораторіях підприємств витримувалися необхідні для калібрування та проведення вимірювань температура, тиск повітря та вологість і протягом часу проведення калібрування швидкої зміни температури не спостерігалось. Зовнішній огляд, випробування були проведені відповідно до методики калібрування та технічної документації на устаткування.

Визначення метрологічних параметрів дозиметричних устаткування.

Визначення розмірів однорідного поля.

В усіх випадках визначалися розміри однорідного поля устаткування УПГД-2 з коліматором діаметром 100 мм. Розміри визначалися на відстані 1 м в полі гамма-джерела з Cs-137, що створює потужність експозиційної дози близько 10 Р/год на метрі. ПЕД вимірювалася дозиметром, що складається з вимірювача ДКС-АТ 5350/1 і камери типу А-К-253. Мінімальні розміри камери необхідні для отримання більш достовірних результатів вимірювання розмірів поля. У полі колімованого пучка на відстані 1 метр від джерела, у площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження пучка, переміщалося камера А-К-253. Вимірювалася ПЕД у десяти точках поля, рівномірно розподілених у перерізі пучка через 3,5 см. У кожній точці проводилося 8 вимірювань ПЕД і визначалося їхнє середнє арифметичне значення. В результаті вимірювань отримані розміри однорідного поля, в якому ПЕД змінювалася в межах 3%. Розміри поля не перевищують розміру кола діаметром 30 см.

Дослідження дотримання закону обернених квадратів.

Перевірка закону квадратів відстаней проводилася методом прямих вимірів за допомогою ДКС-АТ 5350/1 з набором камер об'ємом 1,2 см³ та 1 дм³. За результатами вимірювань знайдено крайні точки лінійок УПГД-2, де значення ПЕД, приведені до відстані 1 м, не перевищують 2.5% за модулем.

Результати калібрування гамма-джерел в якості мір потужності керми в повітрі (потужності експозиційної дози).

Гамма-джерела Cs-137 і Co-60 калібрувалися методом прямих вимірювань керми в повітрі (потужності експозиційної дози), створюваної ними в умовах типового коліматора, на різних відстанях між джерелом та детектором, де виконується

умови дотримання закону обернених квадратів у межах відношення виміряного значення до середнього арифметичного значення, приведеного до відстані 1 м, не гірше від 0,99 до 1,01.

У даний період проведено калібрування еталонних устаткування типу «УПД-Інтер», які представляють собою устаткування закритого типу з одним гамма-джерелом. Установка створює ПЕД від 2×10^{-4} Р/год до 3×10^2 Р/год. Такий широкий діапазон значень ПЕД можливо створити за рахунок зміни потужності дози варіацією фільтрів, які входять до складу устаткування, та зміною відстаней «джерело-детектор».

Дані устаткування мають низку переваг над установками інших типів: УПГД-1, УПГД-2, УПЛ-4 та інших.

Висновки до розділу 3

1. Проведені дослідження стосуються еталонів дозиметричних одиниць іонізуючого випромінювання та еталонних устаткування колімованої та неколімованої геометрії, оскільки саме вони гарантують метрологічну надійність передавання розміру одиниці випромінювання. Це – технологічне устаткування надавача метрологічних послуг – ДП «Київоблстандартметрологія».

2. У результаті вивчення комбінованих ризиків виробництва ЗВТ ІВ - надання метрологічних послуг щодо калібрування ЗВТ ІВ та зниження метрологічних ризиків кінцевого споживача, запропоновано метрологічні заходи, направлених на покращення якості ЗВТ:

- за рахунок підвищення ризику ДП «Київоблстандартметрологія» (надавача послуг калібрування), а саме введення додаткових операцій метрологічного контролю істотно знизити ризики кінцевих споживачів ЗВТ.

- модифікувати підходи щодо формування вибірки й розділити підходи, що використовують вибірку за ЗВТ та за можливостями калібрування. Виходячи із специфіки калібрування ЗВТ ІВ змінної номенклатури залежно від замовлення, запропоновано вибір ЗВТ ІВ з урахуванням можливостей калібрування.

- релевантним підходом можна вважати розгляд ЗВТ ІВ стосовно їх характеристики, наприклад шляхом врахування їх поставленої для перевірки кількості, пов'язуючи цю кількість з продуктивністю еталонного устаткування, спроможного їх кваліфікувати.

3. Розглянуто й обмірковано особливості передавання розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних устаткування колімованої геометрії. Тут важливою характеристикою можна вважати місцезнаходження каліброваних ЗВТ у зоні опромінення. За результатами проведених досліджень, виділено простір забезпечується рівномірність характеристик опромінення, а відповідний імпаکت-фактор є мінімальним. Подібним чином оцінено наявність і значення факторів впливу при передаванні розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами, які відносяться до устаткування неколімованої геометрії.

4. На основі досвіду попередньої експлуатації та вивчення особливостей використання еталонних устаткування рентгенівського та гамма-випромінювання здійснено модернізацію зазначених устаткування. Удосконалено методики калібрування еталонних устаткування (1-й етап передавання розміру одиниці в умовах ДП «Київстандартметрологія»). Також розроблено і вдосконалено методики калібрування дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз опромінення, як останній етап передавання розміру одиниці.

5. Технічно і організаційно складна робота, що базується на оптимізації дози опромінення, здійснена вперше. При цьому, оцінено спроможність зазначених устаткування забезпечити відтворення спеціальних вимог стандартів ЄС при калібрування ЗВТ ІВ. Придатність останніх підтверджена результатами міжлабораторних випробувань та калібрувань.

РОЗДІЛ 4. ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОЗИМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ

4.1. Модернізація еталонного устаткування рентгенівського та гамма-випромінювання та уточнення методики їх калібрування

Методика повинна визначати порядок проведення, зміст і об'єм робіт по виконанню калібрування устаткування рентгенівського випромінювання, дозиметричних устаткування та радіонуклідних джерел гамма-випромінювання (далі устаткування та гамма-джерела) згідно зі стандартами ДСТУ ISO 4037-1:2006, ГОСТ 8.087-81, МИ 1986-89 [99].

4.1.1. Призначення та сфера застосування

Методика може розповсюджуватися на устаткування та гамма-джерела, які призначені для проведення випробувань, калібрування чи метрологічної перевірки засобів вимірювання амбієнтного і індивідуального еквівалента дози та потужності амбієнтного і індивідуального еквівалента дози; експозиційної дози та потужності експозиційної дози; керми в повітрі та потужності керми в повітрі; поглинутої дози та потужності поглинутої дози (далі – дози та потужності дози) рентгенівського та гамма-випромінювання.

4.1.2. Метод калібрування та метрологічні характеристики устаткування та гамма-джерел, що підлягають калібруванню

Устаткування та гамма-джерела потрібно калібрувати наступними методами (див. ДСТУ ISO 4037-1:2006, ГОСТ 8.087-81, МИ 1986-89):

- прямі вимірювання за допомогою еталонного дозиметра;
- метод звіряння за допомогою компаратора (групового компаратора) з еталонною гамма-установкою.

Значення діапазонів фізичних величин та розширеної невизначеності результатів калібрування наведені в Табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Діапазони фізичних величин та розширена непевність результатів калібрування

№ п/п	Вимірювана величина	Метод калібрування	Діапазон вимірювань	Розширена непевність, U, % при $k=2$, $P=0.95$
1	Амбієнтний еквівалент дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Зв до 5×10^5 Зв	(5,5 - 10) %
2	Індивідуальний еквівалент дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Зв до 5×10^5 Зв	(5,5 - 10) %
3	Керма в повітрі або поглинена доза гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Гр до 5×10^5 Гр	(4,0 - 10) %
4	Експозиційна доза гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-5} Р до 5×10^7 Р	(4,0 - 10) %
5	Потужність амбієнтного еквіваленту дози	Прямі вимірювання	від 1×10^{-10} Зв/с до 50 Зв/с	(5,5 - 10) %

	гамма- та рентгенівського випромінення	Метод звіряння		
6	Потужність індивідуального еквіваленту дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Зв/с до 50 Зв/с	(5,5 - 10) %
7	Потужність керми в повітрі або потужність поглиненої дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Гр/с до 50 Гр/с	(4,0 - 10) %
8	Потужність експозиційної дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-8} Р/с до 5×10^3 Р/с	(4,0 - 10) %

4.1.3 Операції і засоби калібрування

При проведенні калібрування потрібно виконати наступні операції:

- зовнішній огляд;
- опробування;
- визначення геометричних розмірів рівномірного поля випромінення;
- визначення дози та потужності дози;
- визначення інтервалу робочих відстаней;
- оцінювання непевності калібрування;
- оформлення результатів.

При проведенні калібрування використовують еталонне та допоміжне обладнання, які повинні мати відповідні сертифікати калібрування для забезпечення процедури калібрування. Еталони, допоміжне обладнання, яке використовується під час калібрування устаткування (гамма-джерел), та їх метрологічні характеристики наведені в Табл.4.2.

Таблиця 4.2. Еталони, допоміжне обладнання та їх метрологічні характеристики

Назва та умовне позначення еталонів, допоміжного обладнання	Заводський номер	Метрологічні характеристики	Розширена непевність
Вторинний еталон одиниць експозиційної дози, потужності експозиційної дози гамма-випромінювання ВЕТУ 12-08-01-98	№ 03	Діапазон вимірювання потужності експозиційної дози від 0,05 мР/год до 7082 мР/год Діапазон вимірювання експозиційної дози від 5×10^{-5} Р до 50 Р	$U = 3,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)
Установка повірочна гамма-дозиметрична УПГД-2 (РЕТУ 12-06-02-02)	№ 03	Діапазон потужності амбієнтного та індивідуального еквіваленту дози від 0,8 мкЗв/год до 210 мЗв/год	$U = (5,0 - 8,0) \%$ ($k = 2, P = 0,95$)
Установка повірочна УПГД-2 з двома джерелами з радіонуклідом радій-226 типу ЕР9 та ЕР8	№ 03, № ČS 6065, № ČS 7494	Діапазон потужності експозиційної дози від $7,0 \times 10^{-4}$ Р/год до $2,3 \times 10^{-2}$ Р/год	$U = 4,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)

<p>Дозиметр універсальний ДКС-АТ5350/1 з іонізаційною камерою типу ТМ 30013, типу ТМ 23342 (РЕТУ 12- 05/06-15)</p>	<p>№ 10543, № 04587, № 1600</p>	<p>Потужність керми в повітрі рентгенівського випромінення від $4,4 \times 10^{-3}$ Гр/хв до 3×10^3 Гр/хв; керма в повітрі рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-5}$ Гр до 5×10^5 Гр</p>	<p>$U = 3,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)</p>
		<p>потужність амбієнтного еквівалента дози рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-4}$ Зв/хв до 3×10^3 Зв/хв; амбієнтний еквівалент дози рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-5}$ Зв до 5×10^5 Зв</p>	<p>$U = 5,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)</p>
<p>Дозиметр ДКС-АТ5350/1 з іонізаційними камерами типу ТМ 30013, типу ТМ 32002</p>	<p>№ 10543, № 0458, № 00353</p>	<p>Камера типу ТМ 30013: Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення цезій-137 $5,010 \times 10^7$ Гр/Кл Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення кобальт-60 $4,962 \times 10^7$ Гр/Кл Камера типу ТМ 32002:</p>	<p>$U = 3,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)</p>

		Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення цезій-137 $2,508 \times 10^4$ Гр/Кл Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення кобальт-60 $2,484 \times 10^4$ Гр/Кл	
Комплекс рентгенівський універсальний серії RoSHER-K (компаратор)	№ 13-02- 15-25	Енергетичний діапазон від 48 кеВ до 79 кеВ	U=3,0 % (k=2, P=0,95)
Установка рентгенівська РУМ-21М (компаратор)	№ 75	Енергетичний діапазон від 8 до 33 кеВ	U=(3,0-5,0) % (k=2, P=0,95)
Дозиметр рентгенівського та гамма-випромінення ДКС-АТ1123	№ 51778	Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози від 50×10^{-9} Зв/год до 10 Зв/год	U = 8,0 % (k = 2, P = 0,95)
Секундомір-таймер електронний HS45	№ 1	Діапазон вимірювання від 0 с до 3600 с	U= (0,02- 0,04)с (k = 2, P = 0,95)
Гігрометр психрометричний ВИТ-1	A412	Діапазон вимірювання від 0 °С до 25 °С	U = (0,14- 0,19)°С (k = 2, P = 0,95)

Гігрометр психрометричний ВИТ-2	A792	Діапазон вимірювання від 16 °С до 40 °С	U = (0,06- 0,09)°С (к = 2, Р = 0,95)
Рулетка вимірювальна металева Р5 УЗК	№ 3	Номінальна довжина 5 м, ціна поділки шкали 1,0 мм	U=(0,6 - 0,7)мм. (к = 2, Р = 0,95)
Кутомір з цифровим відліковим пристроєм типу 360°-0,1°-Ц	№ 703004	Діапазон кутової частини від 0 ° до 360 °	U= 0,2 ° (к = 2, Р = 0,95)
Барометр-анероїд контрольний тип БАММ-1	3214	Діапазон вимірювання атмосферного тиску від 94.66 кПа до 104.00 кПа	U = (0,021 - 0,089) кПа (к = 2, Р = 0,95)
Водяний фантом		Габаритні розміри 30см × 30см × 15см	Не нормується

Підготовка до калібрування

Еталони, устаткування, гамма-джерела та допоміжне устаткування повинні бути підготовлені до калібрування у відповідності до їх ЕД. Еталонні дозиметри, компаратори та інші допоміжні ЗВТ перед калібруванням повинні знаходитися в певних кліматичних умовах до встановлення робочого режиму (час встановлення робочого режиму ЗВТ вказується в ЕД на них, але не менше 15 хвилин). Зовнішній огляд проводять у відповідності з ЕД на устаткування.

При проведенні зовнішнього огляду повинно бути встановлено:

- відповідність комплектності устаткування вимогам технічної документації

в обсязі, необхідному для проведення калібрування;

- наявність експлуатаційної документації на установку (формуляра або паспорта, технічного опису);

- наявність джерел випромінювання з діючими термінами служби;

- відсутність в полі випромінювання устаткування сторонніх предметів, які можуть впливати на результати калібрування.

Опробування проводиться відповідно до ЕД на устаткування та гамма-джерела. При опробуванні перевіряють:

- працездатність органів управління установкою;
- можливість розташування детектора в полі випромінювання, його фіксації і переміщення уздовж поля випромінювання;
- можливість переміщення і фіксації фільтрів та заслінки перекриття пучка випромінювання;
- працездатність контрольних дозиметричних приладів.

Усі характеристики якості випромінювання треба вибирати, створювати та перевіряти згідно з ДСТУ ISO 4037-1:2006 (п.4, п.6).

Визначення геометричних розмірів рівномірного поля випромінювання

Геометричні розміри рівномірного поля по потужності дози для устаткування з направленим колімованим пучком випромінювання і градуовальною лінійкою в місці розташування детектора вимірюють за допомогою еталонного дозиметричного приладу. Розмір детектора або діаметр вхідного отвору вільно-повітряної іонізаційної камери, за допомогою яких визначають рівномірність поля, повинен бути не більше 1/3 мінімального лінійного розміру перетину пучка.

У полі колімованого пучка випромінювання на певній відстані від джерела в площині, перпендикулярній напрямку поширення пучка, розміщують детектор еталонного дозиметричного приладу і вимірюють потужність дози по двох взаємно перпендикулярних осях в площині перетину пучка не менше ніж в семи рівномірно розподілених точках. В кожній i точці виконують не менше п'яти вимірювань, визначають їх середньоарифметичні значення \bar{X}_i і відхилення α_i в процентах від середньоарифметичного значення потужності дози \bar{H} в геометричному центрі поля:

$$\alpha_i = \frac{\bar{X}_i - \bar{H}}{\bar{H}} \quad (4.1)$$

Поле випромінення вважається рівномірним в області, де відхилення α_i не перевищує $\pm 5\%$. Якщо ця умова для крайніх обраних точок не виконується, слід перевіряти його для точок, розташованих ближче до центру пучка устаткування, до тих пір, поки не будуть знайдені точки, що лежать на границі зони рівномірного поля.

На еталонні устаткування, що реалізують метод подібності та еквівалентного поля, а також на устаткування без типового вузла колімації вимоги до рівномірності поля не поширюються.

Визначення дози (потужності дози).

Прямі вимірювання за допомогою еталонного дозиметра.

Модельне рівняння визначення дози (потужності дози) – наступне:

$$H = h \times N_{ref} \times H_{ref} \times k_r \times k_t \quad , \quad (4.2)$$

де H – значення дози (потужності дози) устаткування, що калібрується; H_{ref} – еталонне значення (покази еталонного дозиметра); N_{ref} – коефіцієнт калібрування еталонного приладу; k_r – коригуючий коефіцієнт до відстані; k_t – коригуючий коефіцієнт на час опромінення; h – коефіцієнт перетворення (керми в еквівалент дози, амбієнтного еквіваленту дози в індивідуальний еквівалент дози тощо). Значення h наведено в ДСТУ ISO 4037-1:2006 та МИ 1788-87.

Коефіцієнт перетворення використовують, якщо еталонний дозиметр вимірює величину, подібну до основної. Якщо еталонний дозиметр прямо вимірює основну величину, то коефіцієнт перетворення дорівнює одиниці.

Коефіцієнт k_t використовується лише для вимірювання дози.

Звіряння за допомогою компаратора (групового компаратора) з еталонною гамма-установкою.

За допомогою компаратора визначають дозу (або потужність дози) в полі фотонного випромінювання шляхом порівняння з еталонними дозиметричними приладами. Як еталон використовуються іонізаційні камери еталонного дозиметра. Іонізаційна камера розташовується в місцях, де присутнє поле фотонного випромінювання еталонного обладнання, і показання з компаратора

записуються принаймні десять разів у кожному місці. Визначають середньоарифметичне значення X'_{refl} , в кожній точці. Потім цю ж іонізаційну камеру розміщують в аналогічні точки устаткування (по відстані градуовальної лінійки, по потужності джерел, по якості випромінювання (енергії) тощо), що калібрують, реєструють покази компаратора (не менше десяти значень в кожній точці) і визначають середньоарифметичне значення X'_i .

Для визначення дози (потужності дози) можна використовувати груповий компаратор, що складається з групи однотипних робочих дозиметричних приладів. Число приладів, що підлягають калібруванню, визначають непевність устаткування, і як правило, воно рівне від 3 до 12. Спочатку прилади, що підключені до групового компаратора, перевіряють з допомогою еталонної устаткування. Потім кожен прилад, що підлягає калібруванню, встановлюють у певну точку поля еталонного устаткування. Знімають по чергово значення показів кожного приладу. Середньоарифметичне значення показів всіх приладів приймають за дійсне значення. Це - потужність дози в даній точці поля опромінювання. Вимірювання потужності дози повторюють для всіх заздалегідь обумовлених точок.

Модельне рівняння визначення дози (потужності дози) визначається виразом:

$$H = \frac{H_{ref} \times X \times k_r \times k_t}{X_{ref} \times k_{refr} \times k_{refl} \times k_{refT}}, \quad (4.3)$$

де k_{refT} - коригуючий коефіцієнт, що описує «розпад» еталонного джерела випромінювання. Коефіцієнти k_t , k_{refl} використовують для вимірювання дози. Для устаткування, де застосовують метод подібності з фільтрами різної кратності ослаблення випромінювання, визначають кратність послаблення фільтрів.

Визначення інтервалу робочих відстаней.

При визначенні інтервалу робочих відстаней, на яких можна встановлювати дозиметричні прилади, для устаткування з колімованим (неколімованим) пучком випромінювання і градуовальною лінійкою, перевіряють

коректність дотримання закону квадратів відстаней. Перевірку здійснюють методом прямих вимірювань за допомогою еталонного дозиметричного приладу. Детектор розміщують в полі так, щоби поздовжня вісь пучку випромінення проходила через центр детектора. При цьому, максимальні лінійні розміри детектора не повинні перевищувати 1/2 мінімального лінійного розміру поперечного перерізу пучка. Потужність дози вимірюють у 5-6 точках, рівномірно розподілених уздовж лінійки. У кожній точці здійснюють не менше 5 вимірювань і визначають їх середньоарифметичне значення отриманих результатів вимірювань.

Добуток середньоарифметичного значення потужності дози \bar{X}_i в i -й робочій точці на квадрат відстані від центру активної зони джерела випромінення до центру детектора r_i повинен бути постійним з урахуванням послаблення випромінення в повітр. Цей добуток розраховується за:

$$C_i = \bar{X}_i \times r_i^2 \times e^{\mu \times r_i} \quad , \quad (4.4)$$

де μ - лінійний коефіцієнт послаблення випромінювання в повітрі, m^{-1} . Розкид значень C_i , отриманих у крайніх точках градуовальної лінійки, не повинен перевищувати 5 %. Інтервал градуовальної лінійки устаткування, в якому виконується закон квадратів відстаней, є інтервалом робочих відстаней устаткування.

4.2. Оптимізація процедури розрахунку непевності під час проведення калібрування дозиметричних засобів вимірювальної техніки та еталонного устаткування

У 2007-2008 р. Міжнародні організації прийняли методичні вказівки щодо розгляду вимірювальної непевності при прийнятті рішень щодо оцінки відповідності [10-11]. Посібник із аналізу системи вимірювання стандарту [100] зосереджує увагу на статистичному аналізі системи вимірювання. Відзначено [47], що вимірювальна система повинна належним

чином застосовуватися у виробництві та наданні послуг для забезпечення якості продукції (ЗВТ) в межах прийнятних стандартів. Аналіз системи вимірювань, а методи відбирання об'єктів для проведення досліджень (калібрування) є важливими у плані покращення вимірювальних можливостей [80-81].

Щоб збільшити точність, необхідну для різних типів ЗВТ, пропонують різні методи вимірювання якості. При цьому, важливим вважається встановлення СКВ результатів вимірювань, відомого як непевність вимірювання [81-83]. Проте оскільки дані отримують з допомогою вимірювальних приладів, то ці дані містять власні непевності приладів. Завдяки методу аналізу вимірювальних систем можна покращити достовірність результатів вимірювань, а це сприяє підвищенню якості продукції [91]. Аналіз системи вимірювань в цілому не тільки гарантує можливості контролю (калібрування), чим сприяє науково-технічному прогресу [92]. Якість системи вимірювань і якість продукції – взаємозалежні. Тому вдосконалення вимірювальної системи набуває вирішального значення для забезпечення якості, надійності та зниження загальних ризиків.

На жаль, при дослідженнях не завжди уникають помилок. Існують помилки I типу (прийнятний продукт вважається дефектним) і помилки II типу (дефектний продукт вважається прийнятним). Ці два види помилок формують 2 види неправильно прийнятих рішень. Їх позначають відповідно як: ризик виробника, коли фіксується відхилення характеристик товару від оптимальних, і ризик клієнта, який приймає товар неналежної якості.

Метрологічні ризики

Ми зосередимося на дефектах типу II, оскільки вони безпосередньо піддають клієнтам ризик скарг і фінансових втрат через зниження якості. У результаті стає вкрай важливим ефективно управління вимірювальними системами, оскільки, як зазначено в [41-45], вони є важливими для зусиль, спрямованих на підвищення калібру продукції. Значення індексу та якість продукції одночасно погіршуються підвищеною мінливістю, або SLE, що ускладнює моніторинг методами статистичного контролю [39? 41]. Якщо система вимірювання недостатньо точна, справжнє значення регульованої

характеристики спотворюється. Це призводить до вдосконалення системи вимірювання.

Нульова статистична похибка по відношенню до досліджуваних об'єктів характеризує ідеальну систему вимірювань. З огляду на те, що не існує такого поняття, як бездоганне вимірювання, ви повинні покладатися на вимірювальну систему для вивчення та керування поширенням даних, зібраних за допомогою неї, гарантуючи, що результати будуть обґрунтованими. Основним інструментом у системі управління якістю є перевірка системи вимірювання. Для розрахунку його допустимих відхилень він використовує математичну статистику, графічні підходи до проектування та статистичний аналіз похибок. [40-42]. Методи оцінки вимірювальної системи включають калібрування, кореляцію приладу та аналіз вимірювальної системи. Усі вони використовуються для оцінки надійності вимірювальної системи та гарантують збір, обробку та інтерпретацію даних.

Ризики, зумовлені непевністю вимірювань.

У 2017 р. переглянуто стандарт [32] стосовно калібрувальних і випробувальних лабораторій, щоб «удokumentувати прийняте правило прийняття рішень про відповідність даного об'єкту, враховуючи рівнів ризику (наприклад, помилкові прийняття\відхилення, а також статистичні припущення), пов'язані з правилом прийняття рішень». Також, EURAMET запропонував проект EMPIR 17SIP05 “CASoft” (2018 – 2020), щоб зробити статистичну методологію доступною для організацій, які займаються прийняттям рішень щодо оцінки відповідності (калібрувальних і випробувальних лабораторій, промисловців. За допомогою програмного забезпечення цей проект допомагає їм розрахувати пов'язані ризики (включно зі стандартними сценаріями, такими як розгляд розподілу, наявність або відсутність попередніх знань, а також конкретні варіації розподілу ймовірностей, наприклад, двовимірний випадок).

З можливістю для учасників, залучених до проблеми оцінки відповідності, узгодити перед вимірюванням правила прийняття рішень, які застосовуються до випробувань або калібрування, перегляд [32] робить ще більш важливим вирішення проблеми оцінки відповідності в відношенні до невизначеності.

Прийняття рішень при оцінці відповідності

Проблема виникає відразу після вимірювання. Щоб визначити, чи продукт (інструмент тощо) відповідає специфікаціям, вимірне значення спочатку порівнюється з інтервалом допуску бажаного значення. Крім того, невизначеність вимірювання збільшує ймовірність того, що буде зроблено неправильний вибір, що може призвести до прийняття невідповідного або невідповідного продукту. Ризики неправильних рішень оцінюють за допомогою методу одинарних або подвійних інтегралів.

Відбір здійснюється на основі оцінки єдиної відсоткової суми. Продукт може бути прийнятий (оголошений відповідним) або відхилений (оголошений невідповідним) лише за критеріями двійкового рішення. Іншими словами, не враховуються процентні значення, що складають «область невизначеності».

Оскільки можливими рішеннями є прийняття або відхилення товару чи послуги (у нас - калібрування), то вивчають два поєднані ризики, а саме ризик споживача P_c , як імовірність того, що вивчений товар (надана послуга) не відповідає встановленим вимогам, та ризик виробника P_v , як імовірністю того, що відхилений товар (надана послуга) відповідає виставленим вимогам. Обидва ризики зв'язані між собою через: $P_v = 1 - P_c$. [40].

Повторюване вивчення того самого об'єкту, як подальший розвиток методу аналізу систем

Зазначений підхід передбачає далеко не очевидний підхід щодо загально визнаної тотожності досліджуваних об'єктів, що є недоліком. У результаті стає можливим обчислити СКВ вимірюваних даних, які потім можна використовувати для судження про те, чи відповідає об'єкт заздалегідь визначеній специфікації [81-83]. Коли те саме є предметом повторного вивчення, це завдання змінюється. Тоді, наприклад, зміна його властивостей у часі вказує на конкретні причини чи процеси. При дослідженні високостабільного об'єкта завдання змінюється ще різкіше. У результаті, спостерігаючи повторювані зміни в тій самій характеристиці, ми можемо визначити ефекти вищого порядку. Останні, як правило, приховані різноманітністю інших незалежних, непов'язаних елементів.

При аналізі результатів таких статистичних вимірювань параметрів важливо забезпечити умови рівноточності вимірювань. Тоді відмінності між СКВ результатів вимірювань повинні бути мінімальними. На практиці, проте, відмінності можуть істотно відрізнятися, що призводить до питання «дотримується чи ні умова рівноточності вимірювань. Перевірку можна виконати за статистичними критеріями, порівнявши значення СКВ результатів з критичним значенням.

На жаль, статистичні критерії не спроможні встановити причину нерівності вимірювань: за яких умов різниця між СКВ є мінімальною. Тому здійснено дослідження об'єктів електричної природи – робочих еталонів електричного опору, виготовлених практично 70 років тому. За цей час об'єкти підлягали природньому старінню з мінімізацією в них механічних напружень і, відповідно стабілізацією значень номіналу. Тому, можна було очікувати мінімальних значень СКВ номіналу при повторному вимірюванні [101]. Отримані результати усереднення по 10-кратних вимірюваннях, які проводились: а) протягом 10 секунд (Δt); б) протягом 10 днів (ΔT).

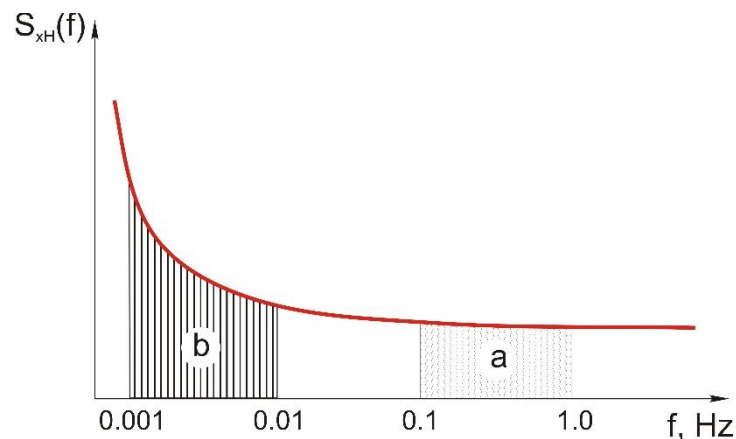


Рисунок 4.1. Енергетичний спектр $S_{xH}(f)$ флуктуацій параметрів для 10 вимірювань, проведених з інтервалом 1 с (а) та 100 с (б)

Критерієм стану досліджуваної системи (високоточного і стабільного опору) є значення τ : при $\tau \rightarrow \infty$, $S_H(f) \cong S_0$ - система знаходиться в рівноважному стані; при $\tau < \infty$ енергетичний спектр системи є таким, як показано на рис.4.3 або система знаходиться в нерівноважному стані (рис.4.2).

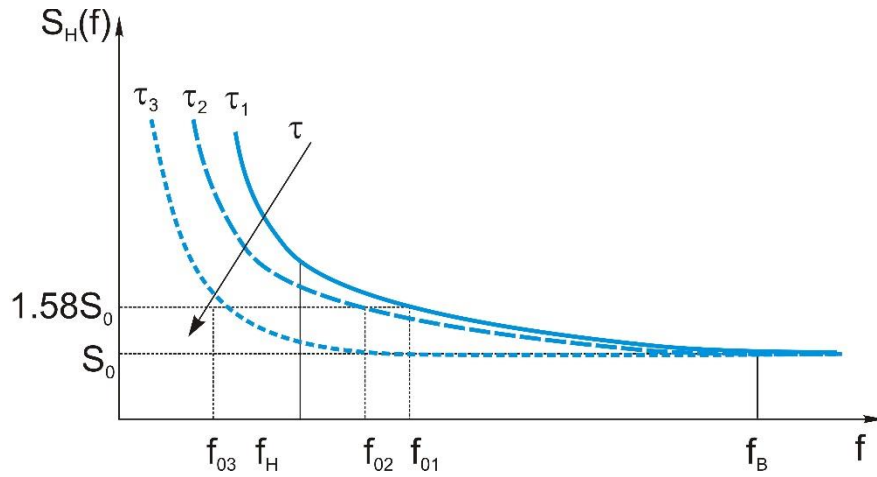


Рисунок 4.2. Енергетичний спектр нерівноважної системи

Дисперсії результатів (СКВ) за різних умов вимірювання відрізняється. За однакових умов вимірювання опорів різні значення дисперсії є наслідком їх різного енергетичного стану. Для перевірки даного положення, здійснено 100-кратні вимірювання в тих самих умовах номіналів 2-х одноомних котушок опорів за 4-провідною схемою підключення до моста постійного струму. Отримані стандартне відхилення σ . Вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань описується визначенням експериментально коефіцієнтом кореляції k . Невелике значення k свідчить, що результати вимірювань є незалежними, а вплив зовнішніх факторів мінімальний (Табл.4.3).

Таблиця 4.3. Вимірювання номіналів опорів А і В

	\bar{R}, Ω	σ, Ω	$\bar{R} \pm 3\sigma, \Omega$	k
Опір А	0,9967	$1,8524 \cdot 10^{-4}$	$0,9967 \pm 5,5572 \cdot 10^{-4}$	0,2271
Опір В	0,9969	$1,2978 \cdot 10^{-4}$	$0,9969 \pm 3,8934 \cdot 10^{-4}$	

Різниця дисперсій результатів для мір А та В становить $\approx 40\%$, що зумовлено відмінністю нерівноважних станів вказаних опорів, спектри флуктуацій енергії яких приведені на рис.4.3. Як видно, спектри спадають обернено пропорційно до частоти, близької до частоти флікер-шуму.

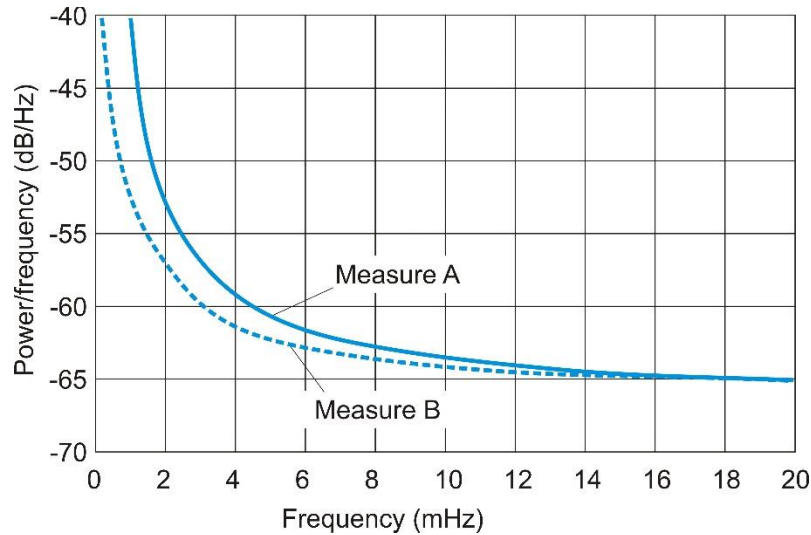


Рисунок 4.3. Спектри флуктуацій опорів А і В [19]

4.3. Калібрування дозиметричних засобів вимірювальної техніки

Опрацювання результатів вимірювань і обчислення непевності при калібруванні виконано згідно з [8-9, 62, 80-82, 100].

Обчислення непевності коефіцієнта калібрування та чутливості дозиметрів в кожній точці калібрування.

Оцінювання стандартної непевності вхідних величин.

Непевність, пов'язана з розбіжністю показів каліброваного приладу розраховується по типу А за формулою:

$$\frac{u_A(\bar{X}_i)}{\bar{X}_i} = \frac{1}{\bar{X}_i} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \times 100 \quad , \quad (4.5)$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad , \quad (4.6)$$

де X_i – результат окремих спостережень; \bar{X}_i – середнє значення багаторазових спостережень. Інші непевності визначаються по типу В.

Непевність, що вноситься еталоном:

$$\frac{u_B(H)}{H} = \frac{U_{\text{ет}}}{2} \quad , \quad (4.7)$$

де U_{em} – розширена непевність еталонного значення із сертифікату калібрування.

Непевність коригуючого коефіцієнта на розпад джерела:

$$k_T = \exp^{-0,693 \frac{t}{T_{1/2}}}, \quad (4.8)$$

де t – час, що минув від моменту калібрування еталонного джерела до моменту калібрування ЗВТ; $T_{1/2}$ – час напіврозпаду джерела. Непевність коригуючого коефіцієнта до відстані відповідно до ДСТУ ISO 4037-3:2006 розраховується за формулою:

$$\frac{u_B(k_r)}{k_r} = \frac{0,2}{r}, \quad (4.9)$$

де r – відстань у метрах. Непевність коефіцієнта перетворення $\frac{u_B(h)}{h}$ відповідно до ДСТУ ISO 4037-3:2006 становить 2 %. Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення:

$$\frac{u_B(k_t)}{k_t} = \frac{U_t}{2 \times t}, \quad (4.10)$$

де U_t – розширена непевність секундоміра; t – час опромінення. Вхідні величини приймаємо як некорельовані. Розрахунок сумарної стандартної непевності коефіцієнту калібрування для методу безпосереднього звіряння здійснюється за:

$$\frac{u(N_B)}{N_B} = \sqrt{\frac{1}{4} \times \left(\frac{u_A(X_{A1})}{(X_{A1})}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{u_A(X_{A2})}{(X_{A2})}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{u_A(X_{B1})}{(X_{B1})}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{u_A(X_{B2})}{(X_{B2})}\right)^2 + \left(\frac{u_B(N_A)}{N_A}\right)^2 + \left(\frac{u_B(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_T)}{k_T}\right)^2} \quad (4.11)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$ застосовується лише для дозиметрів дози.

Бюджет непевності наведено в Табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Бюджет непевності. Приклад подання

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X_{A1}			A
X_{A2}			A
X_{B1}			A
X_{B2}			A
N_A			B
h			B
k_r			B
k_t			B
k_T			B
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
N_B			

Розрахунок сумарної стандартної непевності коефіцієнту калібрування для методу заміщення здійснюється за виразом:

$$\frac{u(N_B)}{N_B} = \sqrt{\left(\frac{u_A(X_A)}{(X_A)}\right)^2 + \left(\frac{u_A(X_B)}{(X_B)}\right)^2 + \left(\frac{u_B(N_A)}{N_A}\right)^2 + \left(\frac{u_B(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_T)}{k_T}\right)^2} \quad (4.12)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$ застосовується лише для дозиметрів дози. Бюджет непевності наведено в Табл.4.5.

Таблиця 4.5. Бюджет непевності. Приклад подання

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X_A			A
X_B			A
N_A			B
h			B
k_r			B
k_t			B
k_T			B
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
N_B			

Розрахунок стандартної непевності коефіцієнта калібрування при прямих вимірюваннях (відоме поле гамма-випромінення) здійснюється за:

$$\frac{u(N)}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_A(X)}{X}\right)^2 + \left(\frac{u_B(H)}{H}\right)^2 + \left(\frac{u_B(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_T)}{k_T}\right)^2} \quad (4.13)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$ застосовується лише для дозиметрів дози. Бюджет непевності наведено в Табл.4.6.

Таблиця 4.6. Бюджет непевності. Приклад подання

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X			A
H			B
h			B

k_r			В
k_t			В
k_T			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
N			

Обчислення непевності лінійної калібрувальної функції (характеристики, залежності) дозиметра.

Стандартну непевність лінійної калібрувальної функції розраховують за формулою:

$$\frac{u(N_f)}{N_f} = \sqrt{\left(\frac{u_B(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u_A(N_{c3})}{N_{c3}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_T)}{k_T}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2} \quad (4.14)$$

де $\frac{u_A(N_{c3})}{N_{c3}}$ – стандартна непевність зваженого середнього коефіцієнта калібрування. При рівноточних вимірюваннях $\frac{u_A(N_{c3})}{N_{c3}}$ розраховується за формулою:

$$\frac{u_A(N_{c3})}{N_{c3}} = \sqrt{\frac{(\sum_1^m (n_j - 1) \times S_j^2 + \sum_1^m n_j \times (N_j - N_f)^2)}{l \times (l - 1)}} \quad (4.15)$$

де S_j^2 - дисперсія коефіцієнта калібрування j -ї точки калібрування:

$$S_j = \frac{1}{N_j} \times \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_1^n (N_i - N_j)^2} \quad (4.16)$$

$$l = \sum_1^m n_j \quad (4.17)$$

При нерівноточних вимірюваннях $\frac{u_A(N_{c3})}{N_{c3}}$ розраховується за формулою:

$$\frac{u_A(N_{c3})}{N_{c3}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_1^m \frac{1}{S_{Nj}^2}}} \quad (4.18)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$ для дозиметрів потужності дози не застосовують. Бюджет непевності наведено в Табл.4.7.

Таблиця 4.7. Бюджет непевності. Приклад подання

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
N			В
N_{c3}			А
h			В
k_r			В
k_T			В
k_t			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
N_f			

Обчислення непевності калібрування дозиметричного еталонного устаткування

Непевність, що пов'язана з розбіжністю показів еталонних дозиметрів (групового компаратора), що застосовуються під час калібрування, розраховується по типу А. Інші непевності визначаються по типу В. Непевність, що вноситься еталоном, оцінюється за формулою (4.7). Непевність коригуючого коефіцієнту на розпад джерела визначають за формулою (4.8). Непевність коригуючого коефіцієнта щодо відстані відповідно до ДСТУ ISO 4037-3:2006

розраховується за формулою (4.9). Непевність коефіцієнту перетворення $\frac{u_B(h)}{h}$ відповідно до ДСТУ ISO 4037-3:2006 становить 2 %. Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення визначена формулою (4.10).

Непевність дрейфу показів еталонного дозиметра визначають за:

$$\frac{u_B(H_{ref})}{(H_{ref})} = 0,5\% \quad (4.19)$$

Вхідні величини приймають як некорельовані.

Розрахунок сумарної стандартної непевності визначення дози (потужності дози) при прямих вимірюваннях.

$$\frac{u(H)}{H} = \sqrt{\left(\frac{u_A(H_{ref})}{H_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(H_{ref})}{H_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(N_{ref})}{N_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2} \quad (4.20)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$ застосовується лише при вимірюванні дози. Бюджет непевності наведено в Табл.4.8.

Таблиця 4.8. Бюджет непевності. Приклад подання

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
H_{ref}			А
			В
N_{ref}			В
h			В
k_r			В
k_t			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
H			

Розрахунок сумарної стандартної непевності визначення дози (потужності дози) для методу звіряння за допомогою компаратора (групового компаратора) з еталонною гамма-установкою, здійснюють за:

$$\frac{u(H)}{H} = \sqrt{\left(\frac{u_A(X)}{X}\right)^2 + \left(\frac{u_A(X_{ref})}{X_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(H_{ref})}{H_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_{refr})}{k_{refr}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_{refl})}{k_{refl}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_{ref\Gamma})}{k_{ref\Gamma}}\right)^2} \quad (4.21)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$, $\frac{u_B(k_{refl})}{k_{refl}}$ застосовується лише для дозиметрів дози. Бюджет непевності наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9. Бюджет непевності. Приклад подання

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X			A
X_{ref}			A
H_{ref}			B
k_r			B
k_t			B
k_{refr}			B
k_{refl}			B
$k_{ref\Gamma}$			B
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
H			

Оформлення результатів калібрування.

Результати калібрування оформляють протоколом та сертифікатом калібрування затвердженої форми, які повинні містити інформацію, умови та результати відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 4037:

- дату і місце калібрування;
- назву гамма-джерела, тип та серійний номер;

- інформація про власника устаткування (гамма-джерела);
- інформація про еталони, які використовувалися при калібруванні;
- умови калібрування;
- результати калібрування включаючи непевність;
- інформація про особу, яка виконувала калібрування;
- інші особливі спостереження.

Отримані результати калібрування приводяться, як і видані Сертифікати, у відповідних документах що були оцінені на місці при підтвердженні компетентності органу з сертифікації продукції - ДП «Київоблстандартметрологія» (див. Додаток 4).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.

1. Оптимізація метрологічних ризиків забезпечення Єдності вимірювань іонізаційних випромінювань, що включають передавання розміру одиниці від Національного еталону до кінцевого споживача через організації, що надають послуги калібрування слід приділити увагу всій системі вимірювання, яка включає: ЗВТ + метрологічна система + опрацювання отриманих результатів. При цьому, слід дотримуватись концепції Аналізу метрологічних систем, яка використовує еталонне устаткування для калібрування ЗВТ. Аналіз отриманих результатів з використання підходу непевності, як це рекомендують стандарти ЄС дає змогу покращити якість ЗВТ та знизити метрологічні ризики для кінцевого споживача даної продукції.

2. Розглянуті аспекти прикладного впровадження методології, методів і засобів метрологічного забезпечення дозиметричних вимірювань характеристик іонізуючого випромінювання на прикладі дозиметрів іонізуючого випромінювання та вимірювачів доз підтверджують важливість та необхідність впровадження положень MSA (Аналізу метрологічних систем) з їх оцінкою стану системи (у даному випадку калібрування ЗВТ) за дисперсією результатів вимірювань.

3. Дисперсія отриманих результатів вимірювань (СКВ) дає змогу сформулювати ставлення до об'єкту (ЗВТ, еталонного устаткування) і встановити чи він відповідає або не відповідає заздалегідь встановленій специфікації. Зміна у часі його характеристики свідчить про якість надаваних послуг.

4. Важливим представляється опрацювання результатів вимірювань, яке вже тривалий час у ЄС проводиться відповідно GUM [8], а у Україні – згідно з [10] та [11]: процедура розрахунку непевності завершує етап калібрування дозиметричних засобів вимірювальної техніки та еталонного устаткування відповідно до стандартів Європейського Союзу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, тема якої стосується метрології і метрологічного забезпечення у галузі вимірювання радіометричних величин з допомогою засобів виміральної техніки, проведені дослідження і вирішені наступні питання.

1. На основі подальшого розвитку методології метрологічного забезпечення, починаючи від еталонів іонізаційного випромінювання, спеціалізованого устаткування для калібрування (повірки) дозиметричних засобів і завершуючи самими засобами, з урахуванням чинної нормативно-технічної бази України і Європейського Союзу, проведена робота і досягнуті позитивні результати щодо підвищення якості і надійності вимірювань.

2. Специфіка роботи полягає у значному обсязі відповідно Схеми передавання розміру одиниці випромінювання від Державного еталону через робочий еталон до конкретних ЗВТ із залученням спеціалізованого устаткування. Комплексність завдання вимагає паралельного відпрацювання кожної ланки Схеми передавання і водночас взаємозв'язку ланок між собою. При цьому, дозиметричні засоби виміральної техніки аналізуються і оцінюються за метрологічними характеристиками у спеціалізованій лабораторії ДП «Київоблстандартметрологія», яка користується робочим еталоном, повіреним за Державним еталоном.

3. На основі проведених досліджень розроблено методики для вивчення конкретних характеристик засобів метрологічного забезпечення, а саме для калібрування дозиметрів з допомогою робочих еталонів на спеціалізованому устаткуванні. На підставі отриманих результатів досліджень послідовно розглядаються методи створення (формування) стандартних характеристик рентгенівського та гамма- випромінювання, адже саме від них залежить точність передавання розміру одиниці випромінювання.

4. Розроблено методики калібрування МК-ІR-03-2020 “Дозиметри, вимірювачі потужності дози гамма- та рентгенівського випромінювання”; МК-ІR-04-2020

“Устаткування рентгенівського випромінення, дозиметричні устаткування та радіонуклідні джерела гамма-випромінення”.

5. Досліджено процедури передачі розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних установках колімованої геометрії типу УПГД-2 та для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами типу УПД-ІНТЕР, що дало змогу підвищити на 28% точність калібрування як самих устаткування, так і дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз.

6. Оскільки калібровані засоби у різних партіях можуть перекривати області застосування, що істотно відрізняються, то і методи формування стандартних характеристик випромінювання та устаткування, що їх реалізують, є різними. Тому вивчено і рекомендуються три види устаткування для передавання розміру одиниці випромінювання.

7. Аналіз результатів досліджень, у межах підходу непевності, дає змогу покращити метрологічні параметри каліброваних засобів вимірювальної техніки. На цій основі запропоновано оновлення методики калібрування дозиметрів та вимірювачів потужності дози гамма- та рентгенівського випромінювання. Процедура визначення, оцінювання та аналізу непевності завершує етап калібрування дозиметричних засобів вимірювальної техніки та еталонних устаткування відповідно до стандартів Європейського Союзу.

8. Дослідження еталонів дозиметричних одиниць іонізуючого випромінення та еталонних устаткування колімованої та неколімованої геометрії гарантують метрологічну надійність передавання розміру одиниці випромінювання. Тут важливою характеристикою можна вважати місцезнаходження каліброваних засобів у зоні опромінення. За результатами проведених досліджень, виділено простір, у якому забезпечується рівномірність характеристик опромінення. На основі досвіду експлуатації та вивчення особливостей використання еталонних устаткування рентгенівського та гамма-випромінювання здійснено модернізацію зазначених устаткування.

9. Розглянуто аспекти прикладного впровадження методології, методів і засобів метрологічного забезпечення дозиметричних вимірювань характеристик іонізуючого випромінення на прикладі дозиметрів іонізаційних випромінювань

та вимірювачів доз. Розроблено і вдосконалено методики їх калібрування, як останній етап передавання розміру одиниці.

10. Особлива увага приділена питанням методології організації вибірок (методи FIFO, LIFO, динамічний метод, тощо), виходячи з пропускнуої здатності еталонного устаткування та його поточного завантаження, що дає змогу регулювати метрологічні ризики в системі «виробник ЗВТ – надавач послуг, зв'язаних з метрологічним забезпеченням – кінцевий користувач» за рахунок введенням додаткових метрологічних заходів на етапі надання послуг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Yatsyshyn, S. Lazarenko, N. Lazarenko, METROLOGICAL SUPPORT OF GAMMA - RAY MEASUREMENTS IN UKRAINE”, Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», том 81, випуск 2, 2020, С. 25-29. DOI: https://doi.org/10.23939/istcmtm_2020.02.025, <https://science.lpnu.ua/istcmtm/all-volumes-and-issues/volume-81-no2-2020>.
2. S. Yatsyshyn, S. Lazarenko, DEVELOPMENT OF THE DOSIMETRIC STANDARDS BASE, Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», том 80, випуск 1, 2019, сс. 46-50. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.046>, <https://science.lpnu.ua/istcmtm/all-volumes-and-issues/volume-80-no1-2019/development-dosimetric-standards-base>.
3. С.Лазаренко, С.Яцишин, Вимірювання параметрів радіоактивного випромінювання, 6-а Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології “Technical using of measurement-2020” 4-7 лютого 2020 року, м. Славське.
4. ДСТУ ISO 4037-1:2006 Рентгенівське та гамма-випромінювання стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 1. Характеристики випромінювання та методи їх створення (ISO 4037-1:1996, IDT).
5. ДСТУ ISO 4037-2:2006 Рентгенівське та гамма-випромінювання стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 2. Дозиметрія для радіаційного захисту в діапазонах енергій від 8кеВ до 1.3 МеВ та від 4МеВ до 9 МеВ (ISO 4037-2:1997, IDT).
6. ДСТУ ISO 4037-3:2006 Рентгенівське та гамма-випромінювання стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 3. Калібрування просторових та індивідуальних дозиметрів і вимірювання їх чутливості як функції енергії та кута падання (ISO 4037-3:1999, IDT).
7. ТЕХНІЧНИЙ РЕГЛАМЕНТ законодавчо регульованих засобів

вимірювальної техніки, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 13 січня 2016 р. № 94.

8. Керівництво з виразу невизначеності вимірювань (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

9. ЕА-4/02 М Вираз невизначеності вимірювання при калібруванні.

10. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-4:2018 Невизначеність вимірювань. Частина 4. Роль невизначеності вимірювань під час оцінювання відповідності (ISO/IEC Guide 98-4:2012, IDT).

11. ДСТУ ISO/IEC Guide 60 : 2007. Оцінювання відповідності. Кодекс усталеної практики, 2008, Держспоживстандарт.

12. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність».

13. ICRU Report 10b Physical Aspects of Irradiation, National Bureau of Standards Handbook 85(1964).

14. Evans, R. D., X-Ray and Gamma- Ray Interactions; in Radiation Dosimetry I, (edited by Attix and Roesch), second edition, Academic Press, New York and London, 1968

15. ICRU Report 51:1993 Quantities and Units in Radiation Protection

16. International Commission on Radiation Units and Measurements, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, ICRU Report 39, Bethesda, MD, 1985

17. International Commission on Radiation Units and Measurements, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources — Part 2, ICRU Report 43, Bethesda, MD, 1988

18. International Commission on Radiation Units and Measurements, Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, ICRU Report 47, Bethesda, MD, 1992.

19. International Commission on Radiation Units and Measurements, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report 51, Bethesda, MD, 1993.

20. ICRU Report 33, 1980 Measurements, Quantities and Units

21. Ю.И. Брегадзе, Э.К. Степанов, В.П. Ярына. Прикладная дозиметрия

ионизирующих излучений. Энергоиздат. Москва, 1990.

22. ICRU Report 25, 1976 Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent

23. ICRU Report 39, 1985 Determination of Dose Equivalent Resulting from External Radiation Sources and ICRU Report 47, 1992, Measurement of Dose Equivalent from External Photon and Electron Radiations

24. Johns, H. E and Cunningham, J. R., The Physics of Radiology, Charles C. Thomas, Springfield, IL, fourth edition, 1983

25. ICRU Report 43:1988 Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources — Part 2

26. ОСПУ-2005 Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України.

27. НРБУ-97 Норми радіаційної безпеки України.

28. International Atomic Energy Agency, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series Report No. 115-1, 1994

29. ICRP Publication 51:1987 Data for Use in Protection against External Radiation

30. ISO 2919:1999 Radiation protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification

31. М. Муkyichuk, N. Lazarenko, S. Lazarenko, A. Riznyk, DEVELOPMENT OF SYSTEM OF PROVIDING METROLOGICAL RELIABILITY OF MEASURING INSTRUMENTS, Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», том 80, випуск 3, 2019, сс. 53-57

32. 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).

33. Вимірювання температури: теорія і практика / [Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І.]. - Львів : Бескид Біт, 2006. - 559 с.

34. Н.К.Булатов. Термодинамика необратимых физико-химических

процессов / Н.К.Булатов, А.Б.Лундин. – Москва : Химия. - 1984. - 334 с.

35. Яцишин С.П. Розвиток теоретичних основ і створення методів і алгоритмів мінімізації похибок термодетеріювачів на основі статистичної термодинаміки: дис.доктора техн. наук : 05.11.04 / Яцишин Святослав Петрович . – Львів, 2008. - 275 с.

36. Toyota Recalls Tundra Pickups for Headlights That Catch Fire. Consumer Reports, Sept. 2021 <https://www.consumerreports.org/car-recalls-defects/toyota-tundra-pickup-recall-for-headlights-that-catch-fire-a1208906316/>

37. 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

38. 8. S. Kudva, R. Potter, Cost analysis and risk assessment for metrology applications, Proceedings Vol. 1673, Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control VI; Event: Microlithography '92, USA, 1992.

39. 9. J. Perez. Risk minimization through metrology in semiconductor manufacturing. Université de Lyon, 2017. HAL Archives, English. ffNNT : 2017LYSEM022

40. С.Яцишин, А. Слюз, RISKS OF CAR PARTS PRODUCTION AND SMART METROLOGY , Вимірювальна техніка та метрологія, 2021, том 82, вип.4, сс.43-50, DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2021.04.043>

41. Ju. Nduhura-Munga, G. Rodriguez-Verjan, S. Dauxere-Peres, C. Yugma, Ph. Vialletelle, J. Pinaton. A literature review on sampling techniques in semiconductor manufacturing. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 26, Iss.2, pp.88–195, 2013.

42. T. Cooke, “Calibration vs. Verification”, Cal-Tek Company, Inc., 2017, (https://www.repaircalibration.com/wp-content/uploads/public_docs/Calibration-vs-Verification.pdf).

43. Ju. Nduhura-Munga. Implementing and optimizing dynamic control plans in semiconductor manufact., PhD thesis, Ecole Nat. Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Gardanne, France, 2012.

44. S. Dauxere-Péres, J.-L. Rouveyrol, C. Yugma, Ph. Vialletelle. A smart

sampling algorithm to minimize risk dynamically. In 2010 IEEE/SEMI Adv. Semiconductor Manufact. Conf. (ASMC), pp.307–310. IEEE, 2010.

45. S. Housseman, S. Dauzère-Pérès, G. Rodriguez-Verjan, J. Pinaton. Smart dynamic sampling for wafer at risk reduction in semiconductor manufacturing. In Aut. Sc. and Eng. (CASE), 2014 IEEE Int. Conf., pp.780–785. IEEE, 2014.

46. P. Vialletelle, S. Dauzère-pérès, C. Yugma, J. Pinaton. A Smart Sampling Scheduling and Skipping Simulator and its evaluation on real data sets. Proc. 2011 Winter Simulation Conf. (WSC), 2011 https://www.academia.edu/17594430/A_Smart_Sampling_Scheduling_and_Skipping_Simulator_.

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

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

49. ДСТУ 7215:2011 Прилади індивідуального дозиметричного контролю. Дозиметри рентгенівського та гамма-випромінення індивідуальні електронні. Класифікація й загальні технічні вимоги

50. ГОСТ 27451-87 Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия. С изменениями 1-2.

51. ГОСТ 25935-83 Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров

52. 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)

53. ГОСТ 8.087-81 Установки поверочные дозиметрические фотонного и электронного излучений. Методы и средства поверки.

54. МИ 1788-87 Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы дозиметрические для измерения экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы, поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы в воздухе фотонного излучения. Методика

поверки.

55. Ю. И. Брегадзе, Э. К. Степанов, В. П. Ярына. Прикладная дозиметрия ионизирующих излучений. Энергоиздат. Москва, 1990.

56. Исследование возможности градуировки блоков детектирования фотонного излучения с использованием рентгеновской устаткування, Л. Л. Синников, Э. Ф. Андриевский. АНРИ №1(80) 48-51, 2015.

57. ГОСТ 8.308-78 Метрология. Функциональные узлы, блоки и устройства аппаратуры для измерения ионизирующих излучений. Счетчики импульсов. Методы и средства поверки.

58. ОСПУ-2005 Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України.

59. НРБУ-97 Норми радіаційної безпеки України.

60. ISO 1677:1977. Sealed radioactive sources –General. [On-line]. Available: <https://www.iso.org/standard/6291.html>.

61. Calibration or radiation protection monitoring instruments, STI/PUB/1017, Safety reports, Series №16, Internat. Atomic Agency, Vienna, 2000 (https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P074_scr.pdf).

62. COOMET R/GM/32:2017. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределённости.

63. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology. – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – JCGM. – 2008. – 90 p.

64. ЕА-4/02 М:2022 Вираження непевності вимірювання при калібруванні.

65. ДСТУ ISO 4037-1:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 1. Характеристики випромінення та методи їх створення (ISO 4037-1:1996, IDT).

66. ДСТУ ISO 4037-2:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 2. Дозиметрія для радіаційного захисту в діапазонах енергій від 8кеВ до 1.3 МеВ та від 4МеВ до 9

MeV (ISO 4037-2:1997, IDT).

67. ДСТУ ISO 4037-3:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення їх чутливості як функції енергії фотонів. Частина 3. Калібрування просторових та індивідуальних дозиметрів і вимірювання їх чутливості як функції енергії та кута падання (ISO 4037-3:1999, IDT).

68. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT)

69. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-4:2018. Непевність вимірювання, ч.4. Роль невизначеності вимірювань під час оцінювання відповідності, (ISO/IEC Guide 98-4:2012, IDT).

70. ДСТУ ISO/IEC Guide 60:2007. Оцінювання відповідності. Кодекс усталеної практики, 2008.

71. Керівництво з виразу невизначеності вимірювань (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

72. М. Mykyichuk, S. Lazarenko, "[Studies of Metrological Characteristics of Measuring Instruments](#)", in Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0, IFSA Publishing, L., 2021, С. 283-325.

73. S. Kondo and M. Randolph, Effect of Finite Size of Ionization Chambers on Measurements of Small Photon Sources, Radiation Research, 13, 1960

74. Gibson, J. A. B., Thompson, I.M.G. and Spiers, F.W.LA Guide to the Measurement of Environmental Gamma Radiation, National Physical Laboratory (British Committee on Radiation Units and Measurements), 1993

75. Burlin, T. E., Cavity-Chamber Theory; in Radiation Dosimetry I, (edited by Attix, F. H. and Roesch, W. C.), Academic Press, New York and London, second edition, 1968

76. IAEA Technical Report, Series No. 277 Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams An International Code of Practice, 1987

77. Alberts, W.G., Ambrosi, P., Bohm, J., Dietze, G., Hohlheid, K. and Will, W. Neue Dosis-Meflgroilen im Strahlenschutz, PTB-Bericht Dos-23, Braunschweig, (1994), ISSN 0172-7095, ISBN 3-89429-507-4

78. С. Яцишин, С. Лазаренко, Н. Лазаренко, “КАЛІБРУВАННЯ ДОЗИМЕТРИЧНИХ ЗАСОБІВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ”, Метрологія та прилади, №4 (84), 2020, С. 40-43.

79. 4-а міжнародна науково-практична конференція “Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи” 16-17 травня 2019 року, Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів.

80. Dimbylow, P.J., Francis, T.M. and Bartlett, D.T. Calibration of Photon Personal Dosemeters in Terms of the ICRU Operational Quantities: Calculations of Phantom Backscatter and Depth-Dose Distributions, NRPB report 230, National Radiological Protection Board, Chilton, (1989)

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

82. EC/TR 62461, 2006-12, Radiation protection instrumentation Determination of uncertainty in measurement Maintenance Result Date: 2009

83. IAEA Techdoc 1401, 2004-07, Quantifying uncertainty in nuclear analytically measurements.

84. L.H.J Peaple, R.Birch, and M. Marshall, *Measurements of the ISO Series of Filtered Radiations*. United Kingdom Atomic Energy Authority Report R 13424, 1989.

85. W.W.Seelentag, W.Panzer, G.,Drexler, L.Platz, and F. Santner, *Catalogue of Spectra for the Calibration of Dosemeters*. GSF Bericht 560, Munich: Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung mbH, 1979.

86. ISO 8963:1998, *Dosimetry of X and gamma reference radiations for radiation protection over the energy range from 8 keV to 1,3 MeV*.

87. M. Roos, and B. Grosswendt, A Simplified Method for Large Range Variations of Dose Rate for ^{137}Cs Gamma Radiation. *Prot. Dosim.*, **18**, 1987, pp. 147-151.

88. M.Roos, and B. Grosswendt. Variation der Dosisleistung von ^{60}Co -Gammastrahlung bei geringer Beeinflussung des Spektrums. *Medizinische Physik*, ed. D.Harder, 1990, pp. 290-291.

89. H.M. Kramer, J. Bohm, W.J. Iles and I.M.G Thompson, On the current

status of an ISO working document on the calibration and type testing of radiation protection dosimeters for photons, *Radiation Protection Dosimetry*, 54, (1994)

90. H.M. Kramer, On the use of conversion coefficients from air kerma to the ICRU quantities for low energy X-ray spectra, *Radiation Protection Dosimetry*, 54, (1994)

91. A. Holfeld, R. Barlovi, R. Good. A fab-wide apc sampling application. *IEEE Trans. on Semiconductor Manufact.*, Vol. 20, Iss.4, pp.393–399, 2007.

92. E.Till, M.Zankl, and G.Drexler, Angular dependence of depth doses in a tissue slab irradiated with monoenergetic photons. *GSF-Bericht 27/95*, Munchen, (1995)

93. B.Grobwendt, Angular-Dependence Factors and Kerma to Dose Equivalent Conversion Coefficients for Cylindrical Phantoms Irradiated by Plane-Parallel Extended Monoenergetic Photon Beams, *Radiation Protection Dosimetry*, 59, (1995)

94. B. Grobwendt, Air Kerma to Dose Equivalent Conversion Coefficients for Cylindrical Phantoms Irradiated by Extended Plane-Parallel Photon Beams of Oblique Incidence Relative to the Cylinder Main Axis, *Radiation Protection Dosimetry*, 59, (1995)

95. D. Harder, and K.-P., Hermann, Tissue Equivalent Materials and the ICRU Sphere Rad. Prot., *Dosim.* 12(2), 1985, pp. 125-128

96. W.J. Iles, *Conversion Coefficients from Air Kerma to Ambient Dose Equivalent for the International Standard Organization – Wide Narrow and Low Series of Reference Filtered X Radiation*. NRPB Report R 206, 1987.

97. ICRP Publication 74:1996 Conversion coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. *Annals of the ICRP*, Val. 26,N2 3/4.

98. International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Pergamon Press, 1997

99. МИ 1986-89 Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Источники гамма-излучения – меры

мощности экспозиционной дозы (мощности кермы в воздухе).

100. М. Дорожовець, Опрацювання результатів вимірювань, Львів, Україна, Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2007.

101. K. Przystupa, Z. Kolodiy, S. Yatsyshyn, Ja. Majewski, Yu. Khoma, I. Petrovska, S. Lasarenko, T. Hut, STANDARD DEVIATION IN THE SIMULATION OF STATISTICAL MEASUREMENTS, METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS, Vol. 30 (2023), No. 1, 17-30 DOI: 10.24425/mms.2023.144403

ДОДАТКИ

ДОДАТОК 1.

МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ УСТАТКУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЕННЯ, ДОЗИМЕТРИЧНІ УСТАТКУВАННЯ ТА РАДІОНУКЛІДНІ ДЖЕРЕЛА ГАММА-ВИПРОМІНЕННЯ

ЗМІСТ

- 1 Призначення та сфера застосування
- 2 Нормативні документи та документи системи якості
- 3 Метод калібрування
- 4 Специфікація вимог (Метрологічні характеристики устаткування та гамма-джерел, що калібруються)
- 5 Операції калібрування
- 6 Засоби калібрування
- 7 Вимоги до кваліфікації виконавців
- 8 Вимоги безпеки
- 9 Умови калібрування
- 10 Поводження з об'єктом калібрування
- 11 Підготовка до калібрування
- 12 Проведення калібрування
- 13 Опрацювання результатів і обчислення непевності вимірювань при калібруванні
- 14 Оформлення результатів калібрування

1 Призначення та сфера застосування

1.1 Дана методика визначає порядок проведення, зміст і об'єм робіт по виконанню калібрування устаткування рентгенівського випромінення, дозиметричних устаткування та радіонуклідних джерел гамма-випромінення (далі устаткування та гамма-джерела) згідно зі стандартами ДСТУ ISO 4037-1:2006, ГОСТ 8.087-81, МИ 1986-89.

1.2 Методика розповсюджується на устаткування та гамма-джерела, які призначені для проведення випробувань, калібрування чи перевірки засобів вимірювання амбієнтного і індивідуального еквівалента дози та потужності амбієнтного і індивідуального еквівалента дози; експозиційної дози та потужності експозиційної дози; керми в повітрі та потужності керми в повітрі; поглинутої дози та потужності поглинутої дози (далі – дози та потужності дози) рентгенівського та гамма-випромінення (далі – фотонного випромінення) (див. ДСТУ ISO 4037-1:2006, ГОСТ 8.087-81, МИ 1986-89).

2 Нормативні документи та документи системи якості

2.1 ДСТУ ISO 4037-1:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення чутливості як функції енергії фотонів. Частина 1. Характеристики випромінення та методи їх створювання. (ISO 4037-1:1996, IDT)

2.2 ДСТУ ISO 4037-2:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення чутливості як функції енергії фотонів. Частина 2. Дозиметрія для радіаційного захисту в діапазоні енергій від 8 кеВ до 1,3 МеВ та від 4 МеВ до 9 МеВ. (ISO 4037-2:1997, IDT).

2.3 ДСТУ ISO 4037-3:2006 Рентгенівське та гамма-випромінення стандартні для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та визначення чутливості як функції енергіях фотонів. Частина 3. Калібрування просторових та індивідуальних дозиметрів і вимірювання їх чутливості як функції енергії та кута падання (ISO 4037-3:1999, IDT).

2.4 ГОСТ 8.087-81 ГСИ. Устаткування поверочные дозиметрические фотонного и электронного излучения. Методы и средства поверки.

2.5 МИ 1986-89 ГСИ. Источники гамма-излучения – меры мощности экспозиционной дозы (Мощности кермы в воздухе). Методика поверки.

2.6 МИ 1788-87 Приборы дозиметрические для измерения экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы, поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы в воздухе фотонного излучения. Методика поверки.

2.7 Керівництво з виразу непевності вимірювань (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

2.8 ЕА-4/02 М:2013 Вираз непевності вимірювання при калібруванні.

2.9 ОСПУ-2005 Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України.

2.10 НРБУ-97 Норми радіаційної безпеки України.

3 Метод калібрування

3.1 Устаткування та гамма-джерела калібрують наступними методами (див. ДСТУ ISO 4037-1:2006, ГОСТ 8.087-81, МИ 1986-89):

- прямі вимірювання за допомогою еталонного дозиметра;
- метод звіряння за допомогою компаратора (групового компаратора) з еталонною гамма-установкою.

4 Специфікація вимог (Метрологічні характеристики устаткування та гамма-джерел, що калібруються)

4.1 Значення діапазонів фізичних величин та розширеної невизначеності результатів калібрування наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1

№ п/п	Вимірювана величина	Метод калібрування	Діапазон вимірювань	Розширена непевність, U, % при $k=2, P=0.95$
1	Амбієнтний еквівалент дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Зв до 5×10^5 Зв	(5,5 - 10) %
2	Індивідуальний еквівалент дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Зв до 5×10^5 Зв	(5,5 - 10) %
3	Керма в повітрі або поглинена доза гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-7} Гр до 5×10^5 Гр	(4,0 - 10) %
4	Експозиційна доза гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 5×10^{-5} Р до 5×10^7 Р	(4,0 - 10) %
5	Потужність амбієнтного еквіваленту дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Зв/с до 50 Зв/с	(5,5 - 10) %
6	Потужність індивідуального еквіваленту дози гамма- та	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Зв/с до 50 Зв/с	(5,5 - 10) %

	рентгенівського випромінення			
7	Потужність керми в повітрі або потужність поглиненої дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-10} Гр/с до 50 Гр/с	(4,0 - 10) %
8	Потужність експозиційної дози гамма- та рентгенівського випромінення	Прямі вимірювання Метод звіряння	від 1×10^{-8} Р/с до 5×10^3 Р/с	(4,0 - 10) %

5 Операції калібрування

При проведенні калібрування виконують наступні операції:

- зовнішній огляд;
- опробування;
- визначення геометричних розмірів рівномірного поля випромінення;
- визначення дози та потужності дози;
- визначення інтервалу робочих відстаней;
- оцінювання непевності калібрування;
- оформлення результатів.

6 Засоби калібрування

6.1 При проведенні калібрування використовують еталонне та допоміжне обладнання, які повинні мати відповідні свідоцтва (сертифікати) про калібрування та/або свідоцтва про верифікацію для забезпечення процедури калібрування.

6.2 Еталони, допоміжне обладнання, яке використовується під час калібрування устаткування (гамма-джерел), та їх метрологічні характеристики наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Назва та умовне позначення еталонів, допоміжного обладнання	Заводськ ий номер	Метрологічні характеристики	Розширена непевність
Вторинний еталон одиниць експозиційної дози, потужності експозиційної дози гамма-випромінення ВЕТУ 12-08-01-98	№ 03	Діапазон вимірювання потужності експозиційної дози від 0,05 мР/год до 7082 мР/год Діапазон вимірювання експозиційної дози від 5×10^{-5} Р до 50 Р	$U = 3,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)
Установка повірочна гамма-дозиметрична УПГД-2 (РЕТУ 12-06-02-02)	№ 03	Діапазон потужності амбієнтного та індивідуального еквіваленту дози від 0,8 мкЗв/год до 210 мЗв/год	$U = (5,0 - 8,0) \%$ ($k = 2, P = 0,95$)
Установка повірочна УПГД-2 з двома джерелами з радіонуклідом радій-226 типу ЕР9 та ЕР8	№ 03, № ČS 6065, № ČS 7494	Діапазон потужності експозиційної дози від $7,0 \times 10^{-4}$ Р/год до $2,3 \times 10^{-2}$ Р/год	$U = 4,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)
Дозиметр універсальний ДКС-АТ5350/1 з іонізаційною камерою типу ТМ 30013, типу	№ 10543, № 04587, № 1600	Потужність керми в повітрі рентгенівського випромінення від $4,4 \times 10^{-3}$ Гр/хв до 3×10^3 Гр/хв;	$U = 3,0 \%$ ($k = 2, P = 0,95$)

ТМ 23342 (РЕТУ 12-05/06-15)		керма в повітрі рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-5}$ Гр до 5×10^5 Гр	
		потужність амбієнтного еквівалента дози рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-4}$ Зв/хв до 3×10^3 Зв/хв; амбієнтний еквівалент дози рентгенівського випромінення від $1,5 \times 10^{-5}$ Зв до 5×10^5 Зв	U = 5,0 % (k = 2, P = 0,95)
Дозиметр ДКС-АТ5350/1 з іонізаційними камерами типу ТМ 30013, типу ТМ 32002	№ 10543, № 0458, №00353	Камера типу ТМ 30013: Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення цезій-137 $5,010 \times 10^7$ Гр/Кл Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення кобальт-60 $4,962 \times 10^7$ Гр/Кл Камера типу ТМ 32002: Калібрувальний коефіцієнт для стандартного випромінення цезій-137 $2,508 \times 10^4$ Гр/Кл Калібрувальний коефіцієнт для стандартного	U = 3,0 % (k = 2, P = 0,95)

		випромінення кобальт-60 $2,484 \times 10^4$ Гр/Кл	
Комплекс рентгенівський універсальний серії RoSHER-K (компаратор)	№ 13-02- 15-25	Енергетичний діапазон від 48 кеВ до 79 кеВ	U=3,0 % (k=2, P=0,95)
Установка рентгенівська РУМ-21М (компаратор)	№ 75	Енергетичний діапазон від 8 до 33 кеВ	U=(3,0-5,0) % (k=2, P=0,95)
Дозиметр рентгенівського та гамма-випромінення ДКС-АТ1123	№ 51778	Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози від 50×10^{-9} Зв/год до 10 Зв/год	U = 8,0 % (k = 2, P = 0,95)
Секундомір-таймер електронний HS45	№ 1	Діапазон вимірювання від 0 с до 3600 с	U= (0,02- 0,04)с (k = 2, P = 0,95)
Гігрометр психрометричний ВІТ-1	A412	Діапазон вимірювання від 0 °С до 25 °С	U = (0,14- 0,19)°С (k = 2, P = 0,95)
Гігрометр психрометричний ВІТ-2	A792	Діапазон вимірювання від 16 °С до 40 °С	U = (0,06- 0,09)°С (k = 2, P = 0,95)
Рулетка вимірювальна металева Р5 УЗК	№ 3	Номінальна довжина 5 м, ціна поділки шкали 1,0 мм	U=(0,6 - 0,7)мм

			($k = 2$, $P = 0,95$)
Кутомір з цифровим відліковим пристроєм типу 360°-0,1°-Ц	№ 703004	Діапазон кутової частини від 0 ° до 360 °	$U = 0,2$ ° ($k = 2$, $P = 0,95$)
Барометр-анероїд контрольний тип БАММ-1	3214	Діапазон вимірювання атмосферного тиску від 94.66 кПа до 104.00 кПа	$U = (0,021 - 0,089)$ кПа ($k = 2$, $P = 0,95$)
Водяний фантом		Габаритні розміри 30см × 30см × 15см	Не нормується

6.3 Допускається використовувати інші еталони та допоміжне обладнання, якщо їх метрологічні характеристики (далі – МХ) не гірші за МХ зазначені в таблиці 6.1.

7 Вимоги до кваліфікації виконавців

7.1 До проведення калібрування допускаються фахівці лабораторії, які:

- мають вищу або середню технічну освіту;
- мають досвід роботи в сфері вимірювань параметрів та характеристик полів гамма- та рентгенівського випромінювання;
- щорічно проходять перевірку знань з техніки безпеки;
- ознайомлені з даною методикою;
- уповноважені на виконання даного виду робіт.

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

8 Вимоги безпеки

8.1 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 діючих інструкціях з охорони праці, радіаційної безпеки та експлуатаційній документації ЗВТ і допоміжного обладнання.

8.2 До проведення калібрування допускаються спеціалісти, що відносяться до персоналу категорії А.

9 Умови калібрування

9.1 Калібрування дозиметрів проводять при наступних робочих умовах:

- температура навколишнього середовища – від 15°C до 25°C;
- відносна вологість повітря – від 50% до 75%;
- атмосферний тиск – від 86кПа до 106 кПа.
- потужність еквівалентної дози на робочому місці не більше 0,25 мкЗв/ч.

9.2 Умови калібрування можуть бути іншими, якщо визначені НТД, технічним завданням тощо.

10 Поводження з об'єктом калібрування

10.1 Отримання, поведження, зберігання, транспортування устаткування (дозиметрів), які надходять на калібрування проводиться відповідно до Процедури «Управління обладнанням ПСУ-КЛ-6.4» калібрувальної лабораторії ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ».

11 Підготовка до калібрування

11.1 Еталони, устаткування, гамма-джерела та допоміжне устаткування повинні бути підготовлені до калібрування у відповідності з їх експлуатаційної документації (далі – ЕД).

11.2 Еталонні дозиметри, компаратори та інші допоміжні ЗВТ перед калібруванням повинні знаходитися в кліматичних умовах, що вказані в п.9, до встановлення робочого режиму (час встановлення робочого режиму ЗВТ вказується в ЕД на них, але не менше 15 хвилин).

12 Проведення калібрування

12.1 Зовнішній огляд

Зовнішній огляд проводять у відповідності з експлуатаційною документацією на устаткування.

При проведенні зовнішнього огляду повинно бути встановлено:

- відповідність комплектності устаткування вимогам технічної документації

в обсязі, необхідному для проведення калібрування;

- наявність експлуатаційної документації на установку (формуляра або паспорта, технічного опису);

- наявність джерел випромінювання з діючими термінами служби;

- відсутність в полі випромінювання устаткування сторонніх предметів, які можуть впливати на результати калібрування.

12.2 Опробування

Опробування проводиться у відповідності з експлуатаційною документацією на устаткування та гамма-джерела. При опробуванні перевіряють:

- працездатність органів управління установкою;

- можливість розташування детектора в полі випромінювання, його фіксації і переміщення уздовж поля випромінювання;

- можливість переміщення і фіксації фільтрів та заслінки перекриття пучка випромінювання;

- працездатність контрольних дозиметричних приладів.

12.3 Процедури калібрування.

12.3.1 Загальні принципи

12.3.1.1 Якість випромінювання.

Усі характеристики якості випромінювання треба вибирати, створювати та перевіряти згідно з ДСТУ ISO 4037-1:2006 (п.4, п.6).

12.3.1.2 Робочі умови калібрування.

Робочі умови повинні відповідати вимогам п.9.

12.3.2 Визначення геометричних розмірів рівномірного поля випромінювання

12.3.2.1 Геометричні розміри рівномірного поля по потужності дози для устаткування з направленим колімованим пучком випромінювання і градувальною лінійкою в місці розташування детектора вимірюють за допомогою еталонного дозиметричного приладу.

Розмір детектора або діаметр вхідного отвору вільно-повітряної іонізаційної камери, за допомогою яких визначають рівномірність поля, повинен бути не більше 1/3 мінімального лінійного розміру перетину пучка.

12.3.2.2 Порядок проведення вимірювань.

В полі колімованого пучка випромінювання на деякій відстані від джерела в площині, перпендикулярній до напрямку поширення пучка, розміщують детектор еталонного дозиметричного приладу і вимірюють потужність дози по двох взаємно перпендикулярних осях в площині перетину пучка не менше ніж в семи рівномірно розподілених точках. В кожній i точці виконують не менше п'яти вимірювань, визначають їх середньоарифметичні значення \bar{X}_i і відхилення α_i в процентах від середньоарифметичного значення потужності дози \bar{H} в геометричному центрі поля:

$$\alpha_i = \frac{\bar{X}_i - \bar{H}}{\bar{H}} \quad (12.1)$$

Поле випромінювання вважається рівномірним в області, де відхилення α_i не перевищує $\pm 5\%$.

Якщо ця умова для крайніх обраних точок не виконується, слід перевірити його для точок, розташованих ближче до центру пучка устаткування, до тих пір, поки не будуть знайдені точки, що лежать на границі зони рівномірного поля.

На еталонні устаткування, що реалізують метод подібності та еквівалентного поля, а також на устаткування без типового вузла колімації вимоги до рівномірності поля не поширюються.

12.3.3 Визначення дози (потужності дози).

12.3.3.1 Прямі вимірювання за допомогою еталонного дозиметра.

12.3.3.1.1 Модельне рівняння визначення дози (потужності дози).

$$H = h \times N_{ref} \times H_{ref} \times k_r \times k_t \quad , \quad (12.2)$$

де H – значення дози (потужності дози) устаткування, що калібрується;

H_{ref} – еталонне значення (покази еталонного дозиметра);

N_{ref} - коефіцієнт калібрування еталонного приладу;

k_r – корегуючий коефіцієнт до відстані;

k_t – корегуючий коефіцієнт на час опромінення;

h - коефіцієнт перетворення (керми в еквівалент дози, амбієнтного еквіваленту дози в індивідуальний еквівалент дози тощо). Значення h наведено в ДСТУ ISO 4037-1:2006 та МИ 1788-87.

Коефіцієнт перетворення використовують, якщо еталонний дозиметр вимірює подібну величину до основної. Якщо еталонний дозиметр прямо вимірює основну величину, то коефіцієнт перетворення дорівнює одиниці.

Коефіцієнт k_t використовується лише для вимірювання дози.

12.3.3.2 Звіряння за допомогою компаратора (групового компаратора) з еталонною гамма-установкою.

12.3.3.2.1 Визначення дози (потужності дози) в полі фотонного випромінення проводять методом звіряння з еталонними дозиметричними установками за допомогою компаратора. Як компаратор використовують іонізаційні камери еталонних дозиметрів. При звіянні устаткування іонізаційну камеру розміщують в точки поля фотонного випромінення еталонної устаткування, і реєструють покази компаратора не менше десяти разів в кожній точці. Визначають середньоарифметичне значення $\overline{X_{refi}}$, в кожній точці. Потім цю ж іонізаційну камеру розміщують в аналогічні точки устаткування (по відстані градуовальної лінійки, по потужності джерел, по якості випромінення (енергії) тощо), що калібрують, реєструють покази компаратора (не менше десяти значень в кожній точці) і визначають середньоарифметичне значення $\overline{X_i}$.

Для визначення дози (потужності дози) можна використовувати груповий компаратор, що складається з групи однотипних робочих дозиметричних приладів. Число приладів визначають невизначенністю устаткування, що калібрується, і як правило, воно дорівнює від 3 до 12. Спочатку прилади, що входять до складу групового компаратора, перевіряють на еталонних установках. Потім кожен прилад розміщують в робочу точку поля устаткування, що

калібрується. Знімають по одному значення з кожного приладу. Середньоарифметичне значення показів всіх приладів приймають за дійсне значення потужності дози в даній точці поля фотонного випромінювання. Вимірювання потужності дози повторюють для всіх робочих точок.

12.3.3.2.2 Модельне рівняння визначення дози (потужності дози).

$$H = \frac{H_{ref} \times X \times k_r \times k_t}{X_{ref} \times k_{refr} \times k_{refT} \times k_{refT}} \quad (12.3)$$

де k_{refT} - коригуючий коефіцієнт на розпад еталонного джерела.

Коефіцієнт k_t , k_{refT} використовуються лише для вимірювання дози.

12.3.3.2.3 Для устаткування, в яких застосовується метод подібності з фільтрами різної кратності ослаблення випромінювання, визначають кратність ослаблення фільтрів.

12.3.4 Визначення інтервалу робочих відстаней.

При визначенні інтервалу робочих відстаней, на які можна розміщувати дозиметричні прилади, для устаткування, що мають колімований (неколімований) пучок фотонного випромінювання і градувальну лінійку, перевіряють дотримання закону квадратів відстаней. Перевірку дотримання закону квадратів відстаней проводять методом прямих вимірювань за допомогою еталонного дозиметричного приладу. Для цього детектор розміщують в поле таким чином, щоб поздовжня вісь пучка випромінювання проходила через центр детектора. При цьому максимальні лінійні розміри детектора повинні бути не більше 1/2 мінімального лінійного розміру поперечного перерізу пучка. Потужність дози вимірюють в п'яти - шести точках, рівномірно розподілених уздовж градувальної лінійки. У кожній точці проводять не менше п'яти вимірювань і визначають їх середньоарифметичне значення. Добуток середньоарифметичного значення потужності дози \bar{X}_i в i -й робочій точці на квадрат відповідної відстані від центру активної частини джерела випромінювання до ефективного центру детектора r_i має бути постійним з урахуванням ослаблення випромінювання в повітрі і розраховуватися за формулою:

$$C_i = \bar{X}_i \times r_i^2 \times e^{\mu \times r_i} \quad (12.4)$$

де μ - лінійний коефіцієнт ослаблення випромінення в повітрі, m^{-1}
 Розкид значень C_i отриманих в крайніх точках градуовальної лінійки, не повинен перевищувати 5%. Інтервал градуовальної лінійки устаткування, в якому виконується закон квадратів відстаней, є інтервалом робочих відстаней устаткування.

13 Опрацювання результатів і обчислення непевності вимірювань при калібруванні

13.1 Оцінювання стандартних непевностей вхідних величин.

Непевність, що пов'язана з розсіюванням показів еталонних дозиметрів (групового компаратора), що застосовуються під час калібрування, розраховується по типу А за формулою:

$$\frac{u_A(X_i)}{\bar{X}_i} = \frac{1}{\bar{X}_i} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (13.1)$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (13.2)$$

де X_i – результат окремих спостережень;

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

Інші непевності визначаються по типу В.

Непевність, що вноситься еталоном:

$$\frac{u_B(H_{ref})}{H_{ref}} = \frac{U_{em}}{2} \quad (13.3)$$

де U_{em} – розширена непевність еталонного значення із свідцтва про калібрування.

Непевність коригуючого коефіцієнта на розпад джерела:

$$k_{refT} = \exp^{-0,693 \frac{t}{T_{1/2}}} \quad (13.4)$$

де t – час який пройшов від калібрування еталонного джерела до калібрування ЗВТ; $T_{1/2}$ – час напіврозпаду джерела; $\frac{u_B(k_{refT})}{k_{refT}}$ менше 0,1%, то нею можна знехтувати.

Непевність коригуючого коефіцієнта до відстані відповідно до ДСТУ ISO 4037-3:2006 розраховується за:

$$\frac{u_B(k_r)}{k_r} = \frac{0,2}{r}, \% \quad (13.5)$$

де r – відстань, м. Непевність коефіцієнта перетворення $\frac{u_B(h)}{h}$ відповідно до ДСТУ ISO 4037-3:2006 становить 2 %.

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення:

$$\frac{u_B(k_t)}{k_t} = \frac{U_t}{2 \times t} \quad (13.6)$$

де U_t - розширена непевність секундоміра; t – час опромінення.

Непевність багаточасової нестабільності еталонного дозиметра:

$$\frac{u_B(H_{ref})}{(H_{ref})} = 0,5\% \quad (13.7)$$

Вхідні величини приймаємо як некорельовані. Розрахунок сумарної стандартної непевності визначення дози (потужності дози) при прямих вимірюваннях.

$$\frac{u(H)}{H} = \sqrt{\left(\frac{u_A(H_{ref})}{(H_{ref})}\right)^2 + \left(\frac{u_B(H_{ref})}{(H_{ref})}\right)^2 + \left(\frac{u_B(N_{ref})}{N_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2} \quad (13.8)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$ застосовується лише при вимірюванні дози. Бюджет непевності наведено в таблиці 13.1

Таблиця 13.1. Бюджет непевності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
H_{ref}			A
			B
N_{ref}			B
h			B

k_r			В
k_t			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
H			

13.4 Розрахунок сумарної стандартної непевності визначення дози (потужності дози) для методу звіряння за допомогою компаратора (групового компаратора) з еталонною гамма-установкою.

$$\frac{u(H)}{H} = \sqrt{\left(\frac{u_A(X)}{X}\right)^2 + \left(\frac{u_A(X_{ref})}{X_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(H_{ref})}{H_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_t)}{k_t}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_r)}{k_r}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_{refT})}{k_{refT}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_{refr})}{k_{refr}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(k_{refT})}{k_{refT}}\right)^2} \quad (13.9)$$

Непевність коригуючого коефіцієнту на час опромінення $\frac{u_B(k_t)}{k_t}$, $\frac{u_B(k_{refT})}{k_{refT}}$

застосовується лише для дозиметрів дози.

Бюджет непевності наведено в таблиці 13.2

Таблиця 13.2. Бюджет непевності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X			А
X_{ref}			А
H_{ref}			В
k_r			В
k_t			В
k_{refr}			В
k_{refT}			В
k_{refT}			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$
H			

14 Оформлення результатів калібрування

Результати калібрування ЗВТ оформляють протоколом та свідоцтвом про калібрування затвердженої форми, які повинні містити:

- дату і місце калібрування;
- назву устаткування (гамма-джерела), тип та серійний номер;
- інформація про власника устаткування (гамма-джерела);
- інформація про еталони, які використовувалися при калібруванні;
- умови калібрування;
- результати калібрування включаючи непевність;
- інформація про особу, яка виконувала калібрування;
- інші особливі спостереження.

ДОДАТОК 2.

ПЕРЕЛІК ЗАРЕЄСТРОВАНИХ ДАНИХ,

що були оцінені під час оцінки на місці для підтвердження компетентності органу з сертифікації продукції ДП «Київський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

Код ДКПП	<u>Назва продукції</u>	<u>Зареєстровані дані, що були оцінені ¹⁾</u>
26.51.41	Радіометри, радіометричні устаткування, дозиметри та вимірювачі потужності дози	<p>ПП «.....р» (м. Київ, вул., код ЄДРПОУ</p> <p>Технічний регламент законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки (модуль F) оцінка відповідності радіометрів-дозиметрів типу:</p> <p>Заявка №___ від ____.2022 р. Ф1.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Протокол за розглядом заявки № __ від _____.2022 р. Ф4.ПОРООВ 7-23;</p> <p>План проведення робіт з оцінювання ЗВТ від _____.2022 р. Ф5.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Акт відбору зразків ЗВТ № ____ від _____.2022 р. Ф6.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Протоколи випробувань ВЛ ДП «Київстандартметрологія» (атестат акредитації _____ від _____.2019 р.): № _____ .2022 р., _____ від _____.2022 р.;</p> <p>Протоколи випробувань ВЛ ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»</p>

		<p>(атестат акредитації _____ від _____ .2022р.): _____ ЗВТ від _____ .2022 р., _____ ЗВТ від _____ .2022 р.р.;</p> <p>Звіт з оцінювання відповідності ЗВТ № 18 від _____ .2022 р. Ф7.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Акт аналізування даних та отриманих результатів оцінювання № _____ від 08.09.2022 р. Ф8.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Рішення про відповідність ЗВТ б/н від 08.09.2022 р. Ф9.ПОРООВ 7-23</p> <p>Сертифікат відповідності №UA.TR.053-0022/F-22 від 08.09.2022р. Ф10.ПОРООВ 7-23</p>
26.51.41	Блоки детектування іонізуючого випромінення	<p>ПП «.....р» (м. Київ, вул., код ЄДРПОУ</p> <p>Технічний регламент законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки (модуль F) оцінка відповідності блоків детектування іонізуючого випромінення типу ... :</p> <p>ПП «.....р» (м. Київ, вул., код ЄДРПОУ</p> <p>Заявка № _____ від _____ .2022 р. Ф1.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Протокол за розглядом заявки № _____ від _____ .2022 р. Ф4.ПОРООВ 7-23;</p> <p>План проведення робіт з оцінювання ЗВТ від _____ .2022 р. Ф5.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Акт відбору зразків ЗВТ № _____ від _____ .2022 р. Ф6.ПОРООВ 7-23;</p>

		<p>Протоколи випробувань ВЛ ДП «Київстандартметрологія» (атестат акредитації _____ від _____ .2019 р.): № _____ .2022 р., _____ від _____ .2022 р.;</p> <p>Протоколи випробувань ВЛ ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» (атестат акредитації _____ від _____ .2022р.): _____ ЗВТ від _____ .2022 р., _____ ЗВТ від _____ .2022 р.р.;</p> <p>Звіт з оцінювання відповідності ЗВТ № 18 від _____ .2022 р. Ф7.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Акт аналізування даних та отриманих результатів оцінювання № _____ від 08.09.2022 р. Ф8.ПОРООВ 7-23;</p> <p>Рішення про відповідність ЗВТ б/н від 08.09.2022 р. Ф9.ПОРООВ 7-23</p> <p>Сертифікат відповідності №UA.TR.053-0022/F-22 від 08.09.2022р. Ф10.ПОРООВ 7-23</p>
--	--	--

Керівник оцінки

_____ (підпис, дата)

_____ (ініціали та прізвище)

**ДОДАТОК 3.
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

«Затверджую»

Перший заступник

генерального директора

ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

_____ В.П. Кириченко

« 10 » січня 2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**результатів дисертаційної роботи на здобуття вченого ступеню доктора
філософії Лазаренком Сергієм Леонідовичем
в ДЕРЖАВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ «КИЇВСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА
СЕРТИФІКАЦІЇ»**

Даним актом підтверджується, що ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» реалізовано наступні результати дисертаційного дослідження, отримані аспірантом Національного університету «Львівська політехніка» Лазаренка Сергія Леонідовича:

- розроблено методику калібрування МК-ІR-03-2020 «Дозиметри, вимірювачі потужності дози гамма- та рентгенівського випромінення»;

- розроблено методику калібрування МК-ІR-04-2020 «Устаткування рентгенівського випромінення, дозиметричні устаткування та радіонуклідні джерела гамма-випромінення»;

- досліджено процедури передачі розміру одиниць гамма-випромінювання для еталонних установок колімованої геометрії типу УПГД-2 та для еталонних устаткування зі свинцевими атенюаторами типу УПД-ІНТЕР, що дало змогу

підвищити точність калібрування як самих устаткування, так і дозиметрів іонізаційних випромінювань та вимірювачів доз.

Перший заступник генерального директора

ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ” _____

В.П. Кириченко

ДОДАТОК 4.

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

СВІДОЦТВО

Реєстраційний № **KIR04025403422** Дата видачі свідоцтва 30 листопада 2022 року
Reference number *Date of issue*

Об'єкт калібрування Установа повірочна дозиметрична
(назва, тип, зав.№) УПД-ІНТЕР, зав. № 22, з гамма - джерелом
Calibration object (name, type, serial number) ^{137}Cs типу ГСs7.023.1 зав. № 035

Назва та адреса замовника **ДП “НАЕК “Енергоатом”, ВП “Аварійно-
технічний центр”**, вул. Прип'ятьська, 1,
Name of customer, address с. Шевченкове, Бучанський р-н, Київська обл.,
08140

Місце проведення калібрування **ДП “НАЕК “Енергоатом”, ВП “Аварійно-
технічний центр”**, вул. Прип'ятьська, 1,
location where the calibration was carried out с. Шевченкове, Бучанський р-н, Київська обл.,
08140

Метод калібрування МК-IR-04-2020 Устаткування рентгенівського
Method of calibration випромінювання, дозиметричні устаткування та
радіонуклідні джерела гамма-випромінювання.
Методика калібрування. Прямі вимірювання.

Всі вимірювання мають простежуваність до одиниць Міжнародної системи SI.

Дане свідоцтво про калібрування може бути відтворене тільки повністю. Будь-яка публікація або часткове відтворення змісту свідоцтва можливе лише з письмової згоди ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”.

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 “KYIVOBLSTANDARTMETROLOGY”.

Перший заступник
генерального директора _____

Валерій КИРИЧЕНКО

Калібрування проведене за допомогою

Calibration was made with

Дозиметр ДКС-АТ5350/1, зав. № 10543 (Сертифікат калібрування UA 01 № 2183 від 11.10.2022 р.)

Умови проведення калібрування

Conditions of calibration

температура повітря - 18 °С;

атмосферний тиск - 100,5 кПа;

відносна вологість - 65 %;

радіаційний фон - 0,16 мкЗв/год.

Результати калібрування, враховуючи невизначеність, згідно протоколу калібрування № IR04025403422 від 29 листопада 2022 року

Calibration results including uncertainty

1. Потужність керми в повітрі (ПК) гамма-випромінення на 29.11.2022 року в напрямі, перпендикулярному до робочої поверхні джерела, на відстані 1 м становить 70,2 мГр/год.
2. Діапазон робочих значень відстаней становить від 25 см до 135 см.
3. Інтервал робочих значень відстаней устаткування, в якому виконується закон обернених квадратів відстаней становить від 50 см до 135 см, із стандартною невизначеністю 3,0 %.
4. Значення потужності керми в повітрі гамма-випромінення для різних відстаней та різної комбінації фільтрів наведено в таблиці 1 та додатку 1.

Таблиця 1

Величина, що вимірюється	Якість випромінення (енергія)	Відстань, см	Комбінація фільтрів	Виміряне значення ПК, мГр/год	Коефіцієнт ослаблення фільтрів, К
Потужність керми в повітрі гамма-випромінення	¹³⁷ Cs (662 кеВ)	25	без фільтрів, затвор виведено з коліматора	1275	1,00
		30		867	1,00
		35		626	1,00
		40		474	1,00
		45		367	1,00
		50		297	1,00
		55		244	1,00
		60		203	1,00

		65		173	1,00
		70		148	1,00
		75		128	1,00
		80		112	1,00
		85		98,6	1,00
		90		87,1	1,00
		95		77,3	1,00
		100		70,2	1,00
		105		62,7	1,00
Потужність керми в повітрі гамма-випромінення	^{137}Cs (662 кеВ)	110	без фільтрів, затвор виведено з коліматора	57,2	1,00
		115		52,2	1,00
		120		48,0	1,00
		125		43,8	1,00
		130		40,0	1,00
		135		37,3	1,00
		100	4	27,6	2,54
		100	3	12,6	5,57
		100	3,4	5,85	12,00
		100	2	5,60	12,54
		100	2,4	2,59	27,10
		100	2,3	1,21	58,02
		100	2,3,4	0,566	124,03
		100	1	0,262	267,94
		100	1,4	0,119	589,92
		100	1,3	0,057	1231,58
		100	1,2	0,027	2600,00
		100	1,3,4	0,026	2700,00
		100	1,2,4	0,012	5850,00
		100	1,2,3	0,0061	11508,20
100	1,2,3,4	0,0031	22645,16		

5. Розширена невизначеність значень потужностей керми в повітрі становить 6,0 % при $k = 2$, $P = 0,95$.

6. Коефіцієнт переходу від одиниці потужності керми в повітрі гамма-випромінення до потужності амбієнтного еквівалента дози гамма - випромінення становить 1,2 Зв/Гр.

7. Стандартна невизначеність коефіцієнта переходу становить 2,0 %.

8. Коефіцієнт переходу від одиниці потужності керми в повітрі гамма-випромінення до потужності експозиційної дози гамма - випромінення становить 0,00875 Р/Гр.

9. Стандартна невизначеність коефіцієнта переходу становить 0,8 %.

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) та EA-4/02 М "Вираження невизначеності вимірювання при калібруванні".

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) and EA-4/02 M "Expression of uncertainty of measurement during calibration".

Відповідальний виконавець,

який проводив калібрування

Person who has performed calibration

Провідний інженер

posada/function

підпис/signature

Руслан БЕРЕСТОВ

ім'я і прізвище/name

Керівник лабораторії

Head of the laboratory

підпис/signature

Лариса МАЛИШ

ім'я і прізвище/name