

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ ИМЕНИ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА»**

На правах рукописи



ЖУКОВ Григорий Васильевич

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ
АКТИВНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ**

Специальность: 2.2.10 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель: **Алексеев Илья Владимирович**, кандидат физико-математических наук, и.о. руководителя лаборатории госэталонов в области измерений активности радионуклидов (НИЛ 2101) Федерального государственного унитарного предприятия Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, 190005, Санкт-Петербург, пр. Московский, 19.

Официальные оппоненты: **Алексеев Игорь Евгеньевич**, доктор химических наук, главный научный сотрудник отделения технологии изотопов Акционерного общества «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина»;

Жеребчевский Владимир Иосифович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ядерно-физических методов исследования Санкт-Петербургского государственного университета.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», 141570, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ»

Защита диссертации состоится 09 сентября 2025 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 32.1.001.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и на сайте по ссылке: <https://www.vniim.ru/dissert.html>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направить по адресу: 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19, ученому секретарю диссертационного совета 32.1.001.01 Чекирде Константину Владимировичу.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



К.В. Чекирда

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Измерения активности гамма-излучающих радионуклидов широко востребованы в измерительной практике. Для определения энергии фотонного излучения, измерения активности радионуклидов, объёмной, удельной активности радионуклидов в жидкостях, почве, пищевых продуктах и др. применяют гамма-спектрометры. В Государственном реестре средств измерений зарегистрировано 179 типов гамма-спектрометров, которые применяются в атомной промышленности, медицине, радиоэкологии, науке и других областях. Большинство из них используются для измерений в области государственного регулирования обеспечения единства измерений, где обязательным условием применения СИ является их поверка. Поверка СИ осуществляется в соответствии с поверочной схемой, во главе которой стоит государственный первичный эталон.

В атомной промышленности гамма-спектрометры используются для контроля качества ядерного топлива, а также для мониторинга радиационной обстановки на объектах атомной энергетики. В медицине гамма-спектрометры применяются для измерений активности гамма-излучающих радионуклидов при диагностике и лечении онкологических заболеваний с помощью радиофармпрепаратов, а также для исследования метаболизма помеченных радионуклидами веществ в организме человека. В центрах гигиены и эпидемиологии гамма-спектрометры используют для контроля пищевых продуктов. Существует потребность в повышении точности измерений гамма-излучающих радионуклидов.

При измерениях активности гамма-излучающих радионуклидов спектрометрическим методом неопределённость измерений определяется прежде всего неопределённостью измерений активности радионуклидов в эталонном радионуклидном источнике, с помощью которого проводится калибровка гамма-спектрометра. Таким образом необходимо совершенствовать метрологическое обеспечение измерений активности гамма-излучающих радионуклидов.

Степень разработанности

Необходимость в образцовых спектрометрических источниках гамма-излучения (точечных источниках фотонного излучения) обоснована в работе Юдина М.Ф., Кармалицына Н.И., Кочина А.Е., Сазоновой Т.Е., Фоминых В.И. Фролова Е.А., Хольновой Е.А.. На практике широкое распространение получили точечные радионуклидные источники фотонного излучения типа ОСГИ-Р производства ЗАО «РИТВЕРЦ», ОСГИ-3 производства АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», ОСГИ-А производства ООО «НТЦ Амплитуда», ИМН-Г-1 производства ФГУП «ВНИИФТРИ». Все вышеперечисленные типы

радионуклидных источников внесены в Государственный реестр средств измерений и выпускаются для выполнения функций рабочих эталонов единицы активности радионуклидов 1 и 2 разрядов.

На момент начала диссертационного исследования поле государственной поверочной схемы «Вторичные эталоны – радионуклидные источники альфа-, бета- и фотонного излучений» было заполнено только радионуклидными источниками в виде закрытых радионуклидных планарных источников бета-излучения типа СО ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$), альфа-излучения типа П9 (^{239}Pu), типа ОСАИ (на основе альфа-излучающих радионуклидов). Вторичные эталоны – точечные радионуклидные источники фотонного излучения отсутствовали, несмотря на то, что с их помощью возможна поверка рабочих эталонов 1 разряда единицы активности радионуклидов – радионуклидных источников фотонного излучения типа ОСГИ, а также существует потребность калибровки гамма-спектрометров с целью уменьшения неопределённости измерения активности радионуклидов.

В 2016 году после работ по совершенствованию, выполненными специалистами ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», утверждён государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016 с обновлённым составом оборудования и улучшенными метрологическими характеристиками по сравнению с ГЭТ 6-95. В состав ГЭТ 6-2016 вошла установка УЭА-7, реализующая метод $4\pi\gamma$ -счёта измерений активности радионуклидов. Применение метода $4\pi\gamma$ -счёта для измерений активности радионуклидов описано S. Pomme, M. Woods, D. Reher, Y. Nedjadi, P. Spring, A. Pavlik, G. Winkler и другими. Однако, до настоящего исследования метод $4\pi\gamma$ -счёта не применялся для измерений активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения.

Цель работы

Уменьшение относительной расширенной неопределённости воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов.

Основные задачи исследования

1. Анализ состояния метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в точечной геометрии на гамма-спектрометрах.
2. Совершенствование воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов для снижения относительной неопределённости измерений активности гамма-излучающих радионуклидов и увеличения верхнего диапазона измерений.

3. Разработка принципов доказательства эквивалентности воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов различными методами, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, посредством сличения установок с подтверждёнными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями.

4. Разработка, испытания и внедрение новых типов эталонов - точечных радионуклидных источников фотонного излучения, обеспечивающих поле вторичных эталонов для источников фотонного излучения государственной поверочной схемы с прослеживаемостью к ГЭТ 6-2016.

Научная новизна

1. Разработаны принципы совершенствования воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов за счёт совместного применения точечных радионуклидных источников фотонного излучения, метода $4\pi\gamma$ -счёта и метода численного моделирования Монте-Карло, а также учёта мёртвого времени за счёт цифровой обработки сигнала, позволяющего увеличить диапазон воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов.

2. Разработана физико-математическая модель, реализующая разработанные принципы совершенствования воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов для точечных радионуклидных источников фотонного излучения.

3. Разработаны принципы доказательства эквивалентности воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, посредством сличения установок с подтверждёнными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями.

Практическая значимость работы

1. Созданы методические основы для воспроизведения единицы активности радионуклидов в точечных радионуклидных источниках фотонного излучения методом $4\pi\gamma$ -счёта на ГЭТ 6-2016.

2. Созданы и внедрены в метрологическую практику вторичные эталоны - точечные радионуклидные источники фотонного излучения на основе 8 радионуклидов. Созданные эталоны обеспечивают поле вторичных эталонов для источников фотонного излучения государственной поверочной схемы с прослеживаемостью к ГЭТ 6-2016 и применяются метрологическими организациями для поверки рабочих эталонов 1-го и 2-го разрядов – радионуклидных источников фотонного излучения и радиометрических установок в соответствии с действующей государственной поверочной схемой.

3. Созданы основы для снижения в 1,5 раза неопределённости измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в испытательных лабораториях, посредством применения при калибровке гамма-спектрометров вторичных эталонов ОСГИ-РТ.

4. Подтверждены измерительные возможности ГЭТ 6-2016 успешным участием в международных ключевых сличениях BIPM.RI(II)-K1.Co-60 по измерению удельной активности ^{60}Co в растворе.

Внедрение результатов работы

Разработанная методика измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта на установке УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016 внедрена в отделе измерений ионизирующих излучений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в виде методики калибровки СК 03-210-МК/39-22-С «Методика калибровки радионуклидных источников фотонного излучения в единице активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта».

По состоянию на 01.10.2024 точечные радионуклидные источники фотонного излучения ОСГИ-РТ, внесённые в реестр средств измерений (номер в ФИФОЕИ 74005-19) и обеспечивающие поле вторичных эталонов для источников фотонного излучения государственной поверочной схемы с прослеживаемостью к ГЭТ 6-2016, применяются в качестве вторичных эталонов активности радионуклидов общим количеством 52 экземпляра в восьми организациях.

Методология и методы диссертационного исследования

При диссертационном исследовании применялись: теоретический анализ метрологического обеспечения в области измерений активности гамма-излучающих радионуклидов и экспериментальные методы при исследовании метрологических характеристик образцов для международных ключевых сличений по удельной активности ^{60}Co в растворе, образцов для сличений абсолютных методов измерений активности ^{54}Mn , ^{88}Y , удельной активности ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , а также вторичных эталонов – точечных радионуклидных источников фотонного излучения.

Положения, выносимые на защиту

1. Воспроизведение единицы активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта, основанное на алгоритме обработки преобразованного аналогового сигнала, поступающего со сцинтилляционных детекторов, в цифровой разбиейем сигнала на последовательность дискретных точек во времени для определения скорости счёта импульсов, учитывающее процессы взаимодействия излучения радионуклидов с веществом путём определения чувствительности методом численного моделирования Монте-Карло, обеспечивает определение метрологических характеристик точечных радионуклидных источников

фотонного излучения в диапазоне значений от $1 \cdot 10^1$ до $5 \cdot 10^5$ Бк с относительной расширенной неопределённостью ($k=2$) измерений от 0,8 % до 5 % для 23 радионуклидов.

2. Передача единицы активности гамма-излучающих радионуклидов для точечных радионуклидных источников фотонного излучения от ГЭТ 6-2016 с помощью вторичных эталонов – точечных радионуклидных источников фотонного излучения позволяет в 1,5 раза уменьшить относительную расширенную неопределённость измерений активности гамма-излучающих радионуклидов с обеспечением перекрытия энергетического диапазона типовых гамма-спектрометров.

3. Эквивалентность воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта и методами $4\pi\beta$ - γ -совпадений, $4\pi\alpha$ - γ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, доказана с помощью образцов на основе ^{60}Co , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{54}Mn и ^{88}Y посредством сличения установок с подтверждёнными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность научных результатов, полученных в ходе диссертационного исследования базируется на адекватности применённой математической модели измерений, корректной инструментальной реализации метода $4\pi\gamma$ -счёта при разработке и определении метрологических характеристик вторичных эталонов – точечных радионуклидных источников фотонного излучения, а также подтверждением степени эквивалентности Государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016 эталонам национальных метрологических институтов других государств в рамках международных ключевых сличений.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно проведён анализ состояния метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в точечной геометрии спектрометрическим методом, в том числе проведён анализ неопределённости измерений активности гамма-излучающих радионуклидов; анализ схемы передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов от государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016 радиометрам (гамма-спектрометрам). Автором выполнен обзор состояния эталонной базы единицы активности гамма-излучающих радионуклидов и проведён анализ метрологических характеристик существующих эталонов, а также калибровочных и измерительных возможностей ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и зарубежных национальных метрологических институтов в области измерений активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения.

Автором проведено научное обоснование применимости метода $4\pi\gamma$ -счёта, реализованного на установке УЭА-7 в составе ГЭТ 6-2016, для воспроизведения активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения и выполнено его совершенствование, позволившего уменьшить неопределённость измерений активности радионуклидов и увеличить верхний диапазон измерений.

Автором разработаны основные положения методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта; разработаны счётные образцы и лично проведены экспериментальные исследования с составлением бюджета неопределённости измерений активности радионуклидов, оцениванием относительного суммарного СКО и доверительных границ относительной погрешности. Автором разработана методика измерений активности радионуклидов в точечных радионуклидных источниках фотонного излучения методом $4\pi\gamma$ -счёта.

Автором разработаны и реализованы принципы доказательства эквивалентности воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта, $4\pi\beta$ - γ -совпадений, $4\pi\alpha$ - γ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, посредством сличения установок с подтверждёнными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями используя образцы удельной активности ^{60}Co , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , ^{241}Am и ^{137}Cs и активности ^{54}Mn и ^{88}Y .

Автором проведён выбор радионуклидов для создания вторичного эталона - точечных радионуклидных источников фотонного излучения. Автором проведены испытания и определение метрологических характеристик вторичного эталона единицы активности радионуклидов – точечных радионуклидных источников фотонного излучения типа ОСГИ-РТ в целях утверждения типа средств измерений.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы представлены на конференциях:

- 24-й международный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», г. Обнинск Калужской области, ноябрь 2017;
- 25-й международный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», г. Обнинск Калужской области, ноябрь 2018;
- международная научно-техническая конференция «Метрология-2019», БелГИМ, г. Минск, Беларусь, март 2019;
- международная научно-техническая конференция «Ядерное приборостроение. Актуальные вопросы разработки, производства, эксплуатации. Метрология ионизирующих излучений», Росатом, г. Сочи, октябрь 2019;

– 26-й международный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск Калужской области, ноябрь 2019;

– научно-техническая конференция «Ядерное приборостроение: история, современность, перспективы», АО «СНИИП», Москва, октябрь 2022.

– 21-е заседание ТК 1.9 «Ионизирующие излучения и радиоактивность», Республика Узбекистан, г. Ташкент, октябрь 2024.

– III Всероссийский конгресс «Ядерная медицина – 2024», Санкт-Петербург, декабрь 2024.

Публикации

Материалы диссертационного исследования опубликованы в 6 печатных работах, в том числе, 5 статей опубликованы в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК, из них 1 без соавторов.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, приложений и списка литературы, включающего 92 библиографических ссылки. Общий объём работы составляет 131 страницу машинописного текста, включая 49 рисунков, 43 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования. Изложены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** проведён анализ состояния метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов, в том числе средств измерений и нормативных документов, в области измерений активности гамма-излучающих радионуклидов, востребованных на объектах атомной энергетики, медицине, для мониторинга радиационной обстановки, контроля пищевых продуктов.

Проведён анализ неопределённости измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в точечной геометрии спектрометрическим методом. Отмечено, что при относительных измерениях активности гамма-излучающих радионуклидов спектрометрическим методом неопределённость измерений определяется прежде всего неопределённостью измерений активности радионуклидов в эталонном радионуклидном источнике, с помощью которого проводится калибровка спектрометра.

Проведён анализ схемы передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов от государственного первичного эталона радиометрам (гамма-спектрометрам). Отмечена проблема обеспеченности поверочной схемы вторичными эталонами – точечными радионуклидными источниками фотонного излучения.

Проведён анализ состояния эталонной базы единицы активности гамма-излучающих радионуклидов и анализ метрологических характеристик существующих разрядных эталонов – точечных радионуклидных источников фотонного излучения, а также анализ калибровочных и измерительных возможностей ВНИИМ и зарубежных национальных метрологических институтов в области измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения.

Вторая глава посвящена научному обоснованию применимости метода $4\pi\gamma$ -счёта для определения активности гамма-излучающих радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения и совершенствованию метода воспроизведения единицы активности радионуклидов с его использованием. Рассмотрены теоретические аспекты метода $4\pi\gamma$ -счёта применительно к задаче определения активности гамма-излучающих радионуклидов с применением метода численного моделирования, позволяющего выполнить необходимые расчёты чувствительности установки $4\pi\gamma$ -счёта для конкретных радионуклидов.

Изложена реализация метода $4\pi\gamma$ -счёта на установке УЭА-7 с двумя сцинтилляционными детекторами в составе ГЭТ 6-2016. Использование диджитайзера для регистрации импульсов позволяет провести обработку одних и тех же записанных данных с разными настройками. При этом каждый импульс, поступающий с детекторов, обрабатывается индивидуально. Для подсчёта импульсов берётся во внимание не только величина этого импульса, но и время его регистрации, что позволяет усовершенствовать алгоритм определения скорости счёт импульсов с учётом мёртвого времени отдельного импульса. Отмечены сложности учёта мёртвого времени – временного интервала, следующего непосредственно за зарегистрированным событием, в течение которого установка не чувствительна для регистрации фотонов.

Автором обоснована и разработана схема регистрации и счёта импульсов для смешанного мёртвого времени с определением продолжительности живого времени, в течение которого установка чувствительна для регистрации фотонов, представленная рисунке 1.

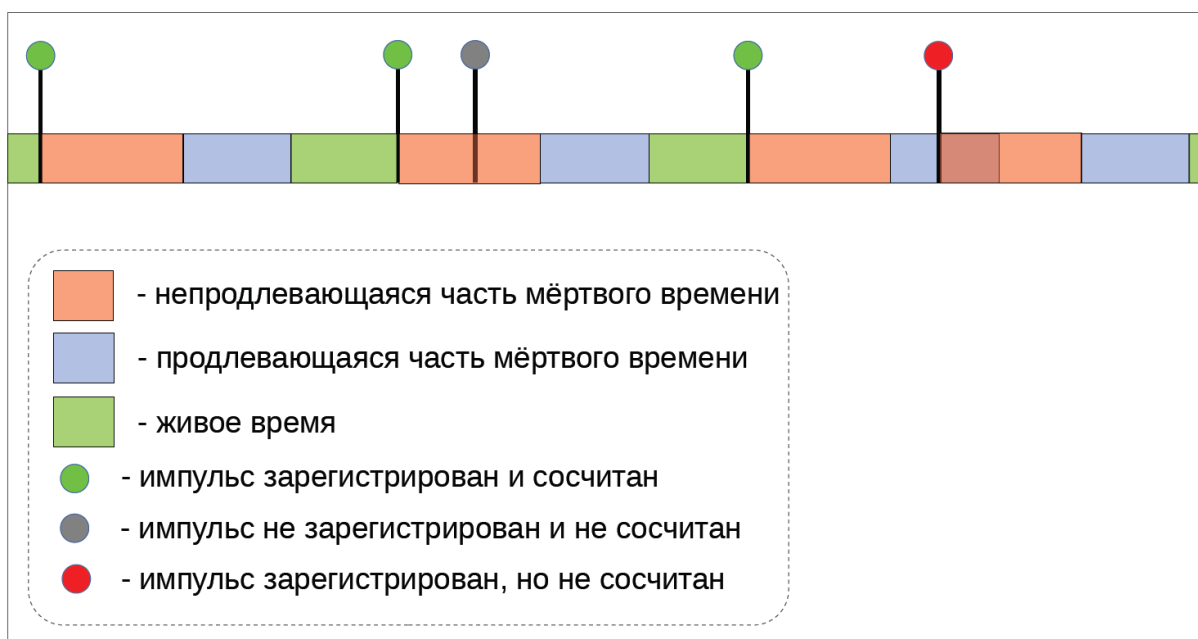


Рисунок 1 – Схема регистрации и счёта импульсов.

Разработанный автором алгоритм счёта импульсов представлен на рисунке 2.

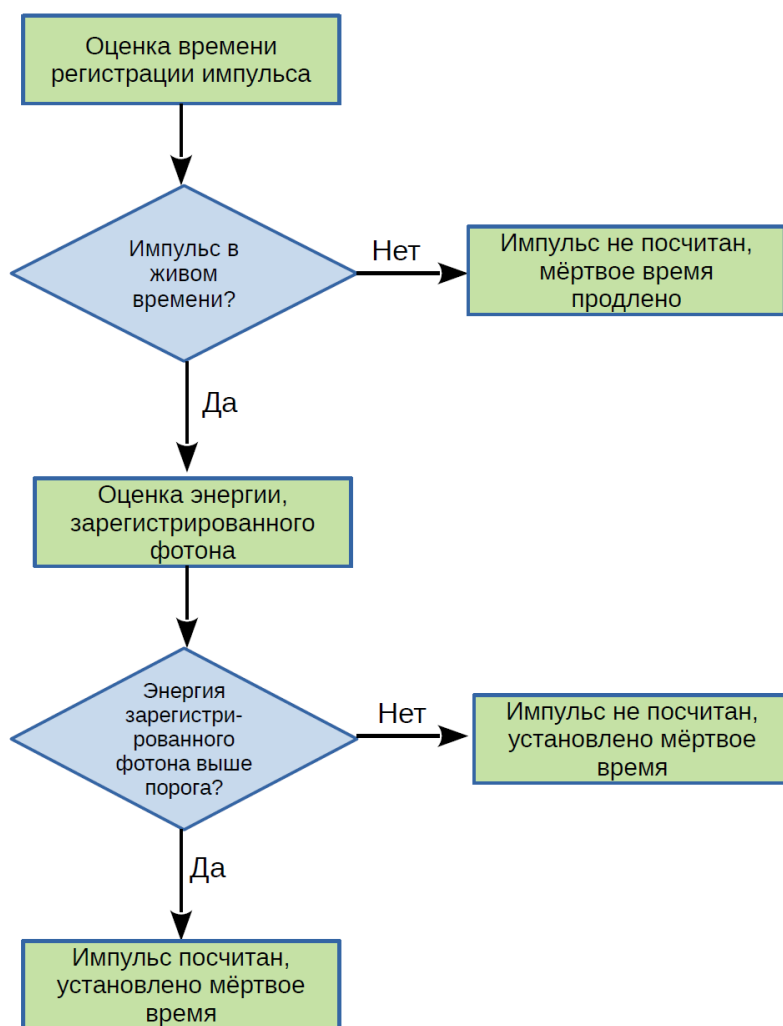


Рисунок 2 – Алгоритм счёта импульсов

Скорость счёта импульсов вычисляется по формуле

$$n = \frac{N}{t_{\text{живое}}},$$

где N – количество посчитанных импульсов;

$t_{\text{живое}}$ – живое время измерений, с.

Разработанный алгоритм обработки сигналов обеспечивает определение скорости счёта импульсов с учётом мёртвого времени отдельного импульса, что позволило исключить компоненту мёртвого времени из формулы измерений и, соответственно, уменьшить неопределённость измерений активности радионуклидов, а также увеличить верхний диапазон измерений.

Определённые автором с помощью расчётного численного метода Монте-Карло, учитывающего процессы взаимодействия излучения радионуклидов с веществом, чувствительности для 23 радионуклидов в геометрии точечных источников фотонного излучения со стандартной неопределённостью от 0,4 до 1,0 % для измерений с помощью двух детекторов, логически объединённых в один общий детектор, позволяют использовать метод $4\pi\gamma$ -счёта для определения активности радионуклидов в точечных радионуклидных источниках фотонного излучения.

В третьей главе представлены обоснованные и разработанные автором основные положения методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта. С учётом усовершенствованного алгоритма определения скорости счёта импульсов фона и скорости счёта импульсов от радионуклидного источника воспроизведение активности радионуклида в источнике A , Бк, методом $4\pi\gamma$ -счёта на установке УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016 осуществляется по формуле

$$A = \frac{\bar{n} - \bar{n}_{\phi}}{\eta} \cdot 2^{\frac{\Delta t}{T_{1/2}}},$$

где $\bar{n}$ – среднее значение скорости счёта импульсов от радионуклидного источника, с⁻¹;

$\bar{n}_{\phi}$ – среднее значение фоновой скорости счёта импульсов, с⁻¹;

η – значение чувствительности установки к данному радионуклиду, определённое методом Монте-Карло, Бк⁻¹·с⁻¹;

Δt – промежуток времени между датой измерения и датой, на которую рассчитывается активность радионуклида, сут.;

$T_{1/2}$ – период полураспада радионуклида, сут..

Автором разработаны счётные образцы из радионуклидов ^{68}Ga , $^{166\text{m}}\text{Ho}$, ^{241}Am для проведения экспериментальных исследований и верификации основных положений методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта. Проведены следующие экспериментальные и теоретические исследования:

- исследование нестабильности фона;
- исследование нестабильности установки УЭА-7 при измерении радионуклидного источника;
- исследование стабильности спектрометрических характеристик установки в низкоэнергетической области спектра;
- исследование алгоритма определения скорости счёта импульсов учёта с учётом мёртвого времени;
- определение верхнего диапазона измерений;
- определение нижнего диапазона измерений с учётом исследования фона установки.

На основе теоретических и экспериментальных данных составлен бюджет расширенной ($k=2$) неопределённости измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта в диапазоне значений от $1 \cdot 10^1$ до $5 \cdot 10^5$ Бк, а также проведено оценивание относительного суммарного СКО и доверительных границ относительной погрешности ($P=0,95$). Относительная расширенная неопределённость ($k=2$) измерений составляет от 0,8 % до 5 % для 23 радионуклидов. Полные бюджеты неопределённостей приведены в тексте диссертации.

Разработанная методика измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта на установке УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016 внедрена в отделе измерений ионизирующих излучений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в виде методики калибровки СК 03-210-МК/39-22-С «Методика калибровки радионуклидных источников фотонного излучения в единице активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта».

В четвёртой главе приведены результаты разработки принципов доказательства эквивалентности воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, с помощью разработанной автором схемы доказательства эквивалентности воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов, реализованной через сопоставление результатов измерений различными методами, используемыми в ГЭТ 6-2016, и через международные ключевые сличения с помощью образцов удельной активности ^{60}Co , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , ^{241}Am и ^{137}Cs и активности ^{54}Mn и ^{88}Y .

Разработанная и реализованная в рамках диссертационного исследования схема доказательства эквивалентности воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов представлена на рисунке 3.

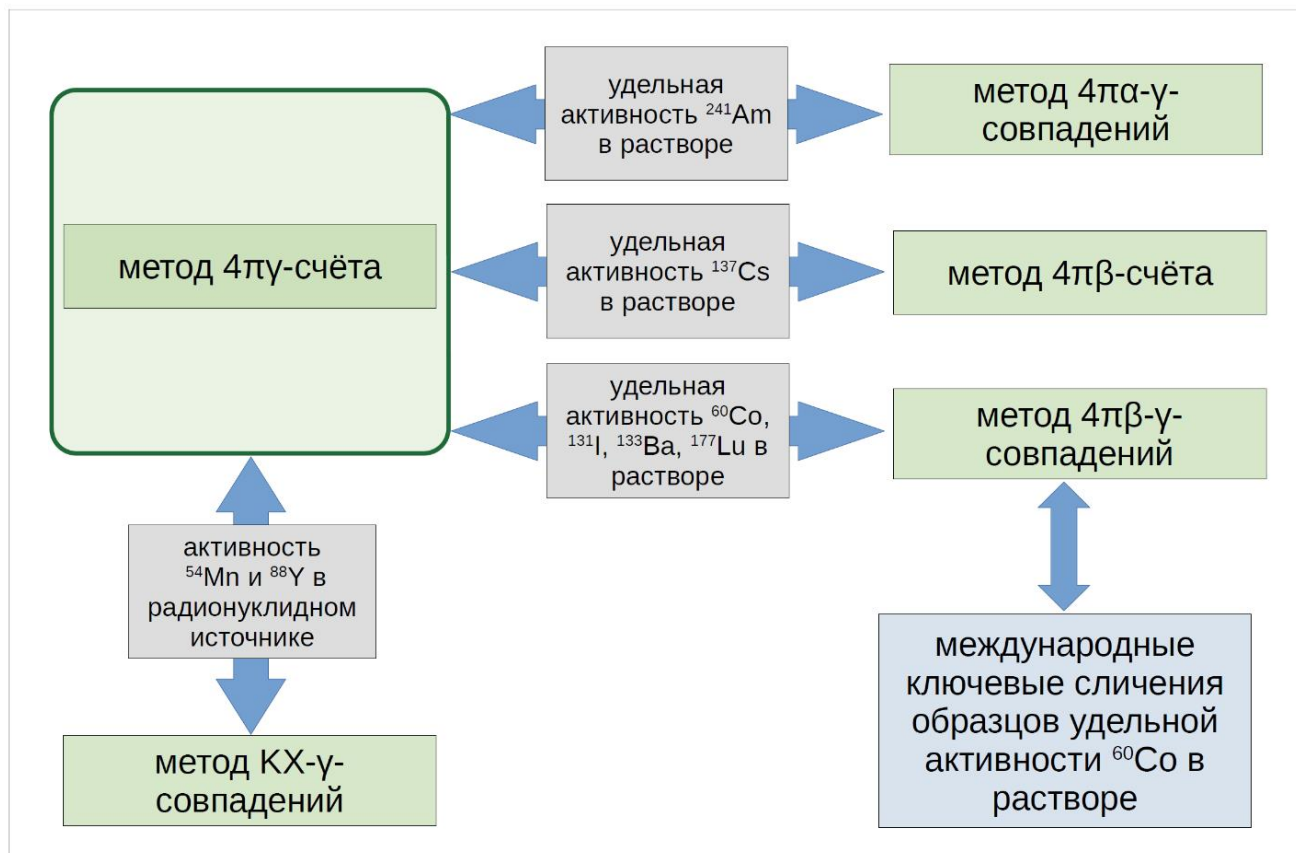


Рисунок 3 – Схема доказательства эквивалентности воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов

Значение удельной активности радионуклида $A_{удj}$, Бк/г, в аликвоте раствора радионуклида рассчитывалось по формуле

$$A_{удj} = \frac{(\bar{n}_j - \bar{n}_\phi)}{m_j \cdot \eta} \cdot 2^{\frac{\Delta t}{T_{1/2}}}$$

где m_j – масса аликвоты раствора в j -ом счётном образце, г.

Взвешенное среднее значение удельной активности радионуклида $\bar{A}_{уд}$, Бк/г, в растворе вычислялось по формуле

$$\bar{A}_{уд} = \frac{\sum_{j=1}^q (p_j \cdot A_{удj})}{\sum_{j=1}^q p_j}$$

где $p_j = \frac{1}{u(n_j)^2} \cdot \frac{\bar{n}_j}{\bar{n}_j - \bar{n}_\phi}$;

q – количество счётных образцов, использованных при измерении.

Полученный результат измерения удельной активности раствора ^{60}Co с относительной расширенной ($k=2$) неопределённостью измерений 0,17 % на установке УЭА-3, реализующей метод $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений, позволил провести доказательство эквивалентности воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта и $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений с подтверждёнными в международных ключевых сличениях BIPM.RI(II)-K1.Co-60 измерительными возможностями государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016.

Графическое представление результатов ключевых сличений BIPM.RI(II)-K1.Co-60 представлено на рисунке 4.

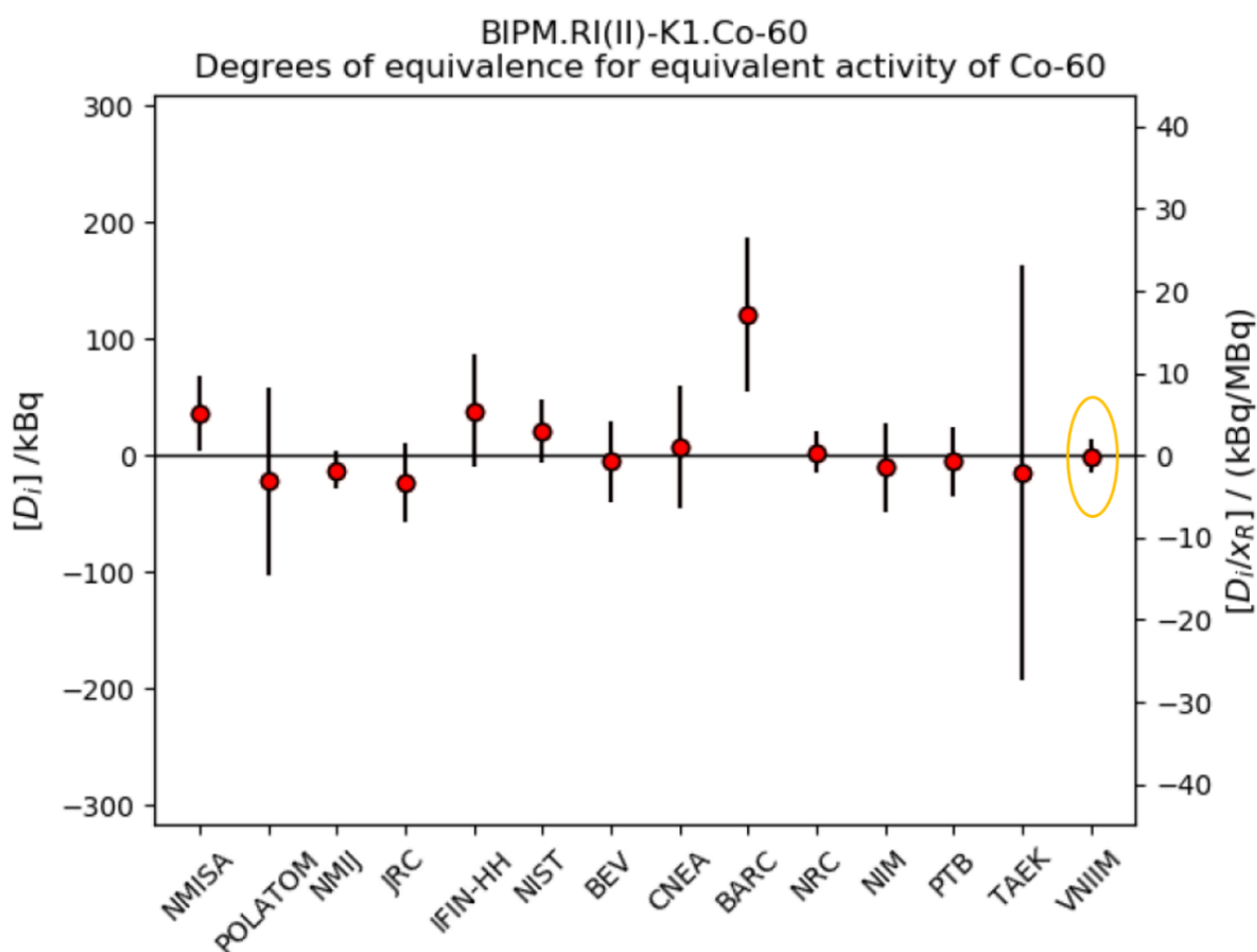


Рисунок 4 – Результаты ключевых сличений BIPM.RI(II)-K1.Co-60

Сопоставление результатов измерений удельной активности радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта и $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений проводилось сличением результатов измерений удельной активности ^{60}Co на установке УЭА-7 методом $4\pi\gamma$ -счёта и на установке УЭА-3 методом $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений. Раствор радионуклида, измеренный на установке УЭА-3 для участия в ключевых международных сличениях, был измерен на установке УЭА-7. Результаты сличений установок из состава ГЭТ 6-2016 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сличений измерений удельной активности ^{60}Co методами $4\pi\gamma$ -счёта и $4\pi\beta$ - γ -совпадений

Радио- нуклид	Установка, метод		Установка, метод		Отличие, %
	Результат измерений, Бк/г	Расширенная неопределённость ($k=2$), %	Результат измерений, Бк/г	Расширенная неопределённость ($k=2$), %	
	УЭА-3, $4\pi\beta$ - γ -совпадений		УЭА-7, $4\pi\gamma$ -счёт		
^{60}Co	$4,229 \cdot 10^5$	0,17	$4,22 \cdot 10^5$	0,9	0,21

Продемонстрирована согласованность результатов измерений методами $4\pi\gamma$ -счёта и $4\pi\beta$ - γ -совпадений.

Измерения удельной активности ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , ^{241}Am методами $4\pi\beta$ - γ -совпадений и $4\pi\alpha$ - γ -совпадений, основанных на счёте импульсов от двух детекторов в каждом канале отдельно и импульсов, совпадающих по времени, осуществлялось на установке УЭА-3 из состава ГЭТ 6-2016. Измерительные возможности государственного первичного эталона в части применения методов $4\pi\beta$ - γ -совпадений и $4\pi\alpha$ - γ -совпадений подтверждены ключевыми сличениями BIPM.RI(II)-K1.Ba-133 и BIPM.RI(II)-K1.Am-241.

Измерение удельной активности ^{137}Cs методом $4\pi\beta$ -счёта, заключающегося в измерении числа заряженных частиц, испускаемых радионуклидным источником на тонкой электропроводящей плёнке-подложке, помещённой внутрь чувствительного объёма пропорционального газоразрядного 4π -счётчика, осуществлялось на установке УЭАП-1 из состава ГЭТ 6-2016. Измерительные возможности государственного первичного эталона в части применения метода $4\pi\beta$ -счёта подтверждены ключевыми сличениями BIPM.RI(II)-K1.Cs-137.

Результаты сличений установок ГЭТ 6-2016 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сличений установок ГЭТ 6-2016

Радио- нуклид	Установка, метод		Установка, метод		Отличие, %
	Результат измерений, Бк/г	Расширенная неопределён- ность ($k=2$), %	Результат измерений, Бк/г	Расширенная неопределён- ность ($k=2$), %	
	УЭА-3, $4\pi\beta$ - γ -совпадений		УЭА-7, $4\pi\gamma$ -счёт		
^{131}I	$1,05 \cdot 10^6$	0,5	$1,04 \cdot 10^6$	1,5	0,95
^{133}Ba	$3,34 \cdot 10^5$	0,6	$3,32 \cdot 10^5$	0,9	0,60
^{177}Lu	$3,11 \cdot 10^5$	0,5	$3,09 \cdot 10^5$	1,8	0,64
	УЭА-3, $4\pi\alpha$ - γ -совпадений		УЭА-7, $4\pi\gamma$ -счёт		
^{241}Am	$5,16 \cdot 10^5$	0,4	$5,11 \cdot 10^5$	2,0	0,97
	УЭАП-1, $4\pi\beta$ -счёт		УЭА-7, $4\pi\gamma$ -счёт		
^{137}Cs	$9,24 \cdot 10^4$	0,6	$9,23 \cdot 10^4$	1,5	0,11

Продemonстрирована согласованность результатов измерений удельных активностей ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , ^{241}Am , ^{137}Cs методами $4\pi\gamma$ -счёта, $4\pi\beta\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта.

Для сопоставления результатов измерений активности ^{54}Mn и ^{88}Y методами $4\pi\gamma$ -счёта и КХ- γ -совпадений использованы точечные радионуклидные источники ОСГИ-РТ.

Измерения активности ^{54}Mn и ^{88}Y методом КХ- γ -совпадений, основанном на счёте импульсов от двух детекторов (КХ и гамма) в каждом канале отдельно и импульсов, совпадающих по времени, осуществлялось на установке УЭА-3 из состава ГЭТ 6-2016. Измерительные возможности государственного первичного эталона в части применения метода КХ- γ -совпадений подтверждены ключевыми сличениями CCRI(II)-K2.Mn-54. Результаты сопоставления результатов измерений активности ^{54}Mn , ^{88}Y методами $4\pi\gamma$ -счёта и КХ- γ -совпадений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сличений установок УЭА-3 и УЭА-7

Радио- нуклид	Установка, метод		Установка, метод		Отличие, %
	Результат измерений, Бк	Расширенная неопределён- ность ($k=2$), %	Результат измерений, Бк	Расширенная неопределён- ность ($k=2$), %	
	УЭА-3, КХ- γ -совпадений		УЭА-7, $4\pi\gamma$ -счёт		
^{54}Mn	$4,02 \cdot 10^4$	1,2	$3,98 \cdot 10^4$	1,5	1,0
^{88}Y	$8,01 \cdot 10^4$	1,2	$8,04 \cdot 10^4$	1,5	0,37

Продemonстрирована согласованность результатов измерений активности ^{54}Mn и ^{88}Y методами $4\pi\gamma$ -счёта и КХ- γ -совпадений.

Проведённое сопоставление результатов воспроизведения активности и удельной активности методами $4\pi\gamma$ -счёта, методами $4\pi\beta\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений доказало эквивалентность воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов различными методами, реализуемыми в ГЭТ 6-2016.

Пятая глава содержит сведения о разработке, испытаниях, исследовании метрологических характеристик и внедрении вторичных эталонов - точечных радионуклидных источников фотонного излучения.

Для комплекта вторичного эталона – точечных радионуклидных источников фотонного излучения типа ОСГИ-РТ выбраны гамма-излучающие радионуклиды, обеспечивающие перекрытие энергетического диапазона типовых гамма-спектрометров, а также обладающие достаточно большим периодом полураспада и высокой интенсивностью гамма-квантов, испускаемых на акт распада. Радионуклидные источники с выбранными восемью

радионуклидами ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{228}Th , ^{241}Am составляют приблизительно 70 % от всего количества выпускаемых точечных радионуклидных источников фотонного излучения.

Точечные радионуклидные источники фотонного излучения ОСГИ-РТ прошли испытания во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в целях утверждения типа средств измерений, регистрационный номер в федеральном информационном фонде обеспечения единства измерений 74005-19, и применяются в качестве вторичных эталонов – радионуклидных источников фотонного излучения. В таблице 4 представлены их метрологические и технические характеристики.

Таблица 4 – Метрологические и технические характеристики вторичных эталонов ОСГИ-РТ

Наименование характеристики	Значение
Диапазон номинальной активности радионуклида в источнике (вторичные эталоны), кБк: - ^{228}Th - ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am	от 1 до 50 от 1 до 100
Относительное суммарное СКО активности для источников в ранге вторичного эталона, %, не более	$\pm 1,5$
Назначенный срок службы источников с даты изготовления, лет: - на основе радионуклидов ^{228}Th , ^{241}Am с активностью менее 10 кБк с активностью более 10 кБк - на основе радионуклидов ^{88}Y - на основе радионуклидов ^{54}Mn - на основе радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{152}Eu	5 3 4 5 12
Габаритные размеры радионуклидных источников, мм, не более: - диаметр - толщина	25 3

Конструкция радионуклидного источника ОСГИ-РТ приведена на рисунке 5. Комплект ОСГИ-РТ, проходивший испытания в качестве вторичного эталона представлен на рисунке 6.



Рисунок 5 – Конструкция радионуклидного источника ОСГИ-РТ

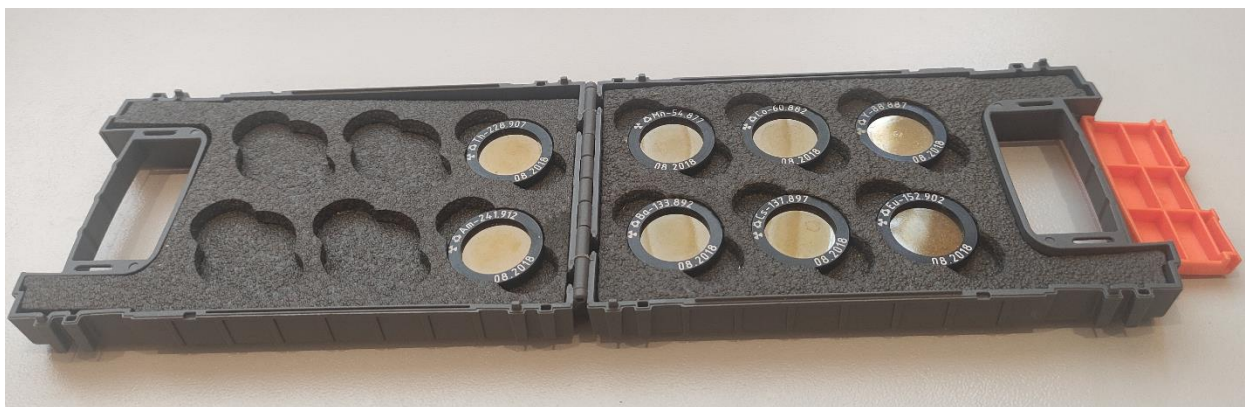


Рисунок 6 – Комплект вторичных эталонов ОСГИ-РТ

Разработанные и прошедшие испытания с целью утверждения типа радионуклидные источники фотонного излучения позволяют заполнить поле вторичных эталонов государственной поверочной схемы и реализовать передачу единицы активности радионуклидов от ГЭТ 6-2016 рабочим эталонам по ветви, не используемой ранее, а также повысить точность гамма-спектрометрических и радиометрических измерений в атомной энергетике, науке, медицине, радиационной экологии и обеспечить единство измерений в области измерений активности гамма-излучающих радионуклидов.

В главе приведена информация о внедрении вторичных эталонов ОСГИ-РТ в метрологическую практику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе анализа потребности обеспечения точности гамма-спектрометрических и радиометрических измерений в атомной энергетике, науке, медицине, радиационной экологии предложено решение актуальной научной задачи – повышение уровня метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов путём воспроизведения активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения на ГЭТ 6-2016, а также разработкой и исследованием нового типа вторичных эталонов.

Полученные результаты диссертационного исследования позволяют уменьшить относительную расширенную неопределённость воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов для точечных радионуклидных источников фотонного излучения от ГЭТ 6-2016 средствами измерений (гамма-спектрометрам и радиометрам) для повышения точности гамма-спектрометрических измерений и обеспечения единства измерений в области измерений активности гамма-излучающих радионуклидов.

На основании проведённых исследований получены научные результаты:

1. Научно обоснована применимость метода $4\pi\gamma$ -счёта, реализованного на установке с двумя сцинтилляционными детекторами УЭА-7 в составе ГЭТ 6-2016, для воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов в точечных радионуклидных источниках фотонного излучения, позволяющего снизить относительную расширенную неопределённость измерений за счёт использования абсолютного метода воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов, вместо относительного метода с использованием калиброванного гамма-спектрометра.

2. Уменьшена относительная расширенная неопределённость воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов в точечных радионуклидных источниках фотонного излучения и увеличен верхний диапазон посредством исключения компоненты мёртвого времени из формулы измерений и определения чувствительности установки УЭА-7 для 23 радионуклидов методом численного моделирования Монте-Карло, учитывающего процессы взаимодействия излучения радионуклидов с веществом.

3. На основе усовершенствованного воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов для точечных радионуклидных источников фотонного излучения, разработана физико-математическая модель определения активности гамма-излучающих радионуклидов в диапазоне значений от $1 \cdot 10^1$ до $5 \cdot 10^5$ Бк с относительной расширенной неопределённостью ($k=2$) измерений от 0,8 % до 5 % для 23 радионуклидов, что позволяет обеспечить диапазон активности радионуклидов и перекрытие энергетического диапазона от 50 кэВ до 3000 кэВ типовых гамма-спектрометров за счёт соответствующего выбора радионуклидов.

4. Обоснованы принципы выбора счётных образцов и их радионуклидного состава для проведения экспериментальных исследований основных положений методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта, составления бюджета неопределённости измерений, оценивания относительного суммарного СКО и доверительных границ относительной погрешности.

5. Доказана эквивалентность воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта, $4\pi\beta\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, посредством сличения установок с подтверждёнными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями с помощью образцов удельной активности ^{60}Co , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , ^{241}Am и ^{137}Cs и активности ^{54}Mn и ^{88}Y . Полученный результат измерения удельной активности раствора ^{60}Co с относительной расширенной ($k=2$) неопределённостью измерений 0,17 % на установке УЭА-3, реализующей

метод $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений, подтвердил измерительные возможности государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016.

6. Разработаны, испытаны и внедрены вторичные эталоны - точечные радионуклидные источники фотонного излучения ОСГИ-РТ на основе 8 радионуклидов (^{241}Am , ^{228}Th , ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{88}Y , ^{60}Co , ^{54}Mn) с применением разработанной методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта.

Внедрение полученных в ходе диссертационной работы результатов позволило обеспечить потребности метрологических центров, калибровочных, поверочных и испытательных лабораторий во вторичных эталонах – радионуклидных источниках фотонного излучения, а также повысить точность гамма-спектрометрических и радиометрических измерений в атомной энергетике, науке, медицине, радиационной экологии и обеспечить единство измерений в области измерений активности радионуклидов.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, включённых в перечень научных журналов ВАК

1. Жуков Г. В. Государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016 / Г. В. Жуков, И. В. Алексеев, А. В. Заневский, Н. Н. Моисеев, С. В. Сэпман, Е. Е. Терещенко, С. Г. Трофимчук, И. А. Харитонов, Т. И. Шильникова // Измерительная техника. – 2019. – № 8. – С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-8-3-7>
2. Жуков Г.В. Исследование мертвого времени установки 4ПГ-счета из состава государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016 / Г.В. Жуков [Текст] // АНРИ. – 2023. № 4 (115). С. 39 – 50. – DOI: 10.37414/2075-1338-2023-115-4-39-50
3. Жуков Г.В., Алексеев И.В., Коростин С.В., Токарев Н.А., Белугин К.В., Озерская А.В., Ганиева Р.М. Единица активности ^{68}Ga : прослеживаемость к государственному первичному эталону // Измерительная техника. — 2022. — № 7. — С. 63–68. — DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-63-68>
4. Michotte C., Courte S., Nonis M., Coulon R., Judge, S., Alekseev I. V., Zanevsky A. V., & Zhukov G. V. Update of the BIPM comparison BIPM.RI(II)-K1.Co-60 of activity measurements of the radionuclide ^{60}Co to include the 2019 result of the VNIIM (Russian Federation) // Metrologia. — 2021. — Vol. 58, No. 1A. — P. 06019. — DOI: 10.1088/0026-1394/58/1A/06019

5. Жуков Г.В. Вторичный эталон единицы активности гамма-излучающих радионуклидов — комплект спектрометрических источников ОСГИ / Г.В. Жуков, И.В. Алексеев, С.М. Аршанский, А.В. Заневский, А.А. Колодка, С.В. Сэпман, Е.Е. Терещенко, С.Г. Трофимчук, Т.И. Шильникова, А.Б. Рогозов // Анри. — 2019. — № 4(99). — С. 3–11.

Публикации в остальных изданиях

1. Сборник докладов международной научно-технической конференции «Метрология-2019» / Под общ. ред. канд. техн. наук Гуревича В.Л. — Мн.: БелГИМ, 2019. — 372 с. — ISBN 978-985-6726-70-8. Место издания: БелГИМ, г. Минск, Беларусь.