

Экз. № 1

УТВЕРЖДАЮ

Врио начальника ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России,
доктор технических наук


М.п. Ю.А. Клейменов
« 06 » 2025 г.



Отзыв

на автореферат диссертации Жукова Григория Васильевича,
выполненную по специальности
2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»
на тему: «Метрологическое обеспечение измерений активности
гамма-излучающих радионуклидов»
и представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Соискателем Жуковым Григорием Васильевичем выполнена диссертационная работа, актуальность которой определяется тем, что с широким применением гамма-спектрометрических и радиометрических измерений в атомной энергетике, науке, медицине, радиационной экологии возникла необходимость в повышении уровня метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов путем воспроизведения активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения на ГЭТ 6-2016, а также разработкой и исследованием нового типа вторичных эталонов. Это обусловлено тем, что на текущий момент при измерениях активности гамма-излучающих радионуклидов спектрометрическим методом неопределенность измерений определяется

прежде всего неопределенностью измерений активности радионуклидов в эталонном радионуклидном источнике, с помощью которого проводится калибровка гамма-спектрометра.

При проведении исследования:

а) автор поставил и решил задачу, заключающуюся в проведении анализа состояния метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в точечной геометрии на гамма-спектрометрах;

б) выполнил разработку и совершенствование методов воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов для снижения относительной неопределенности измерений активности гамма-излучающих радионуклидов и увеличения верхнего диапазона измерений;

в) разработал принципы доказательства эквивалентности воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов различными методами, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, посредством сличения установок с подтвержденными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями;

г) разработал новый тип эталонов – точечные радионуклидные источники фотонного излучения, обеспечивающие поле вторичных эталонов для источников фотонного излучения государственной поверочной схемы с прослеживаемостью к ГЭТ 6-2016.

В ходе решения научной задачи исследования автор получил следующие **наиболее существенные новые научные результаты:**

- научно обоснована применимость метода $4\pi\gamma$ -счета, реализованного на установке с двумя сцинтилляционными детекторами УЭА-2 в составе ГЭТ 6-2016;

- уменьшена относительная расширенная неопределенность 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 с веществом;

- разработана физика-математическая модель определения активности гамма-излучающих радионуклидов в диапазоне значений от $1 \cdot 10^1$ до $5 \cdot 10^5$ Бк с относительной расширенной неопределенностью 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 счет соответствующего выбора радионуклидов;

- обоснованы принципы выбора счетных образцов и их радионуклидного состава для проведения экспериментальных исследований основных положений методики измерений активности радионуклидов методом 4πγ-счета, составления бюджета неопределенности измерений, оценивания относительного суммарного СКО и доверительных границ относительной погрешности;

- доказана эквивалентность воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами 4πγ-счета, 4πβ-γ-совпадений, 4πα-γ-совпадений, 4πβ-счета, КХ-γ-совпадений, реализуемыми в ГЭТ 6-2016, посредством сличения установок с подтвержденными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями с помощью образцов удельной активности ^{60}Co , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{177}Lu , ^{241}Am , ^{137}Cs и активности ^{54}Mn и ^{88}Y , что подтвердило измерительные возможности государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016;

- 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 4πγ-счета.

Новизна полученных научных результатов диссертационных исследований **заключается в том, что автор впервые:**

- разработал принципы совершенствования воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов за счет совместного применения точечных радионуклидных источников фотонного излучения, метода 4πγ-счета и метода численного моделирования Монте-Карло, а также учета мертвого времени за счет цифровой обработки сигнала, позволяющего увеличить диапазон воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов.

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

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

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректным применением общематематического, логического и сравнительно-структурного методов исследования, математического моделирования, статистического анализа экспериментальных данных.

Достоверность полученных научных результатов **подтверждается:**

- примененной математической моделью измерений;
- инструментальной реализацией метода $4\pi\gamma$ -счета при разработке и определении метрологических характеристик вторичных эталонов — точечных радионуклидных источников фотонного излучения;
- подтверждением степени эквивалентности Государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016 эталонам национальных метрологических институтов других государств в рамках международных ключевых сличений.

Теоретическая значимость полученных научных результатов характеризуется тем, что **автором разработаны и обоснованы:**

- метод $4\pi\gamma$ -счета, 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 неопределенность измерений активности радионуклидов и увеличить верхний диапазон измерений;
- методика измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счета;
- принципы доказательства эквивалентности воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методам $4\pi\gamma$ -счета, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счета, КХ- γ -совпадений, реализуемыми в ГЭТ 6-2016.

Практическая ценность полученных научных результатов **состоит в том, что:**

- автором созданы методические основы для воспроизведения единицы активности радионуклидов в точечных радионуклидных источниках фотонного излучения методом $4\pi\gamma$ -счета на ГЭТ 6-2016;

- результаты диссертационных исследований автора использованы при создании и внедрении вторичных эталонов – точечных радионуклидных источников фотонного излучения на основе 8 радионуклидов. Созданные эталоны 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;

- автором созданы основы для снижения в 1,5 раза неопределенности измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в испытательных лабораториях посредством применения при калибровке гамма-спектрометров вторичных эталонов ОСГИ-РТ;

- 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.

Основные результаты исследования с достаточной полнотой опубликованы в 6 научных работах, в том числе 5 в журналах, рекомендованных ВАК, из них 1 без соавторов.

Полученных в ходе исследования и выносимые на защиту **научные результаты** позволили обеспечить потребность метрологических центров, 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.

Текст автореферата соответствует **основному содержанию диссертации**, стиль изложения доказательный.

2. Представленная соискателем Жуковым Григорием Васильевичем диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей существенное значение для метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в Российской Федерации в науке и промышленности. Диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Жуков Григорий Васильевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических

наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Отзыв составили:

Заместитель начальника ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
кандидат технических наук

Д. П. Бачурин

Начальник отдела ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

А.П. Успенский

Младший научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

А.А. Волков

Я, Бачурин Дмитрий Петрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«06» 08 2025 г.

(подпись)

Подпись Бачурина Д.П. заверяю

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ
И СЕРВІСНОГО ФГБУ «ГНМЦ»
МИНОБОРОНЫ РОССИИ

6 08 2025 Л. СТАВИНСКАЯ

Я, Успенский Александр Павлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«06» 08 2025 г.

(подпись)

Подпись Успенского А.А. заверяю

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ
И СЕРВІСНОГО ФГБУ «ГНМЦ»
МИНОБОРОНЫ РОССИИ

6 08 2025 Л. СТАВИНСКАЯ

Я, Волков Александр Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«06» 08 2025 г.

(подпись)

Подпись Волкова А.А. заверяю

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ
И СЕРВІСНОГО ФГБУ «ГНМЦ»
МИНОБОРОНЫ РОССИИ

6 08 2025 Л. СТАВИНСКАЯ