

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Жукова Григория Васильевича

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

Диссертационная работа Жукова Г.В. посвящена развитию метрологического обеспечения измерений активности гамма - излучающих радионуклидов в части уменьшения относительной расширенной неопределённости воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов.

Актуальность темы

В настоящее время в различных областях науки и техники широко применяются измерения активности гамма - излучающих радионуклидов. Для определения энергии фотонного излучения, измерения активности радионуклидов, объёмной, удельной активности радионуклидов в жидкостях, почве, пищевых продуктах и др. применяют гамма-спектрометры. 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 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. Во всех вышеперечисленных и других применениях гамма-спектрометров существует потребность в повышении точности измерений активности гамма-излучающих радионуклидов. При измерениях активности таких радионуклидов спектрометрическим методом неопределённость измерений определяется, прежде всего, неопределённостью



ФГУП
«ВНИИ им. Д. И. Менделеева»

07 АПР 2025

11372

измерений активности в эталонном радионуклидном источнике, с помощью которого проводится калибровка спектрометра. Таким образом, повышение точности при измерениях активности гамма-излучающих радионуклидов является актуальной научной задачей.

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

Во введении приводится общая характеристика работы, сформулированы актуальность работы, цель, задачи работы, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов, в том числе способов передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов от государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016 рабочим эталонам и средствам измерений. Проведен анализ состояния эталонной базы, который показал необходимость обоснования применимости абсолютных методов воспроизведения единицы активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения, разработки методики воспроизведения активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения на государственном первичном эталоне ГЭТ 6-2016 для обеспечения единства измерений и повышения точности гамма-спектрометрических измерений.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы метода $4\pi\gamma$ -счёта применительно к задаче определения активности гамма-излучающих радионуклидов с применением методов численного моделирования, позволяющих выполнить необходимые расчёты чувствительности установки $4\pi\gamma$ -счёта для конкретных радионуклидов. Проведено обоснование применимости метода $4\pi\gamma$ -счёта, реализованного на установке с двумя сцинтилляционными детекторами УЭА-7 в составе первичного эталона ГЭТ 6-2016, для воспроизведения активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения и выполнено его совершенствование посредством:

1. Разработки алгоритма обработки преобразованного аналогового сигнала, поступающего со сцинтилляционных детекторов, в цифровой путём разбиения сигнала на последовательность дискретных точек во времени. 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.

2. Определения расчётным методом Монте-Карло 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, что позволяет использовать метод $4\pi\gamma$ -счёта не только для определения удельной активности растворов радионуклидов в геометрии тонкого образца без самопоглощения фотонов, но и для образцов, имеющих самопоглощение.

В третьей главе приведены основные положения методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта. Модель измерений учитывает реализацию метода $4\pi\gamma$ -счёта на установке УЭА-7 в ГЭТ 6-2016 с логическим объединением двух детекторов установки в единый детектор и разработанный алгоритм определения скорости счёта импульсов с учётом мёртвого времени. 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. 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 проведена оценка относительного суммарного СКО и доверительных границ относительной погрешности ($P=0,95$). Разработанная методика измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта на установке УЭА-7 из состава эталона 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 четвертой главе приведено обоснование 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 реализованных 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 неопределённостью измерений 0,17 %, реализующей метод $4\pi\beta$ - γ -совпадений, позволил провести доказательство эквивалентности воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта и $4\pi\beta$ - γ -совпадений с подтверждёнными в международных ключевых сличениях BIPM.RI(II)-K1.Co-60 измерительными возможностями государственного первичного эталона ГЭТ 6-2016. Проведённое сопоставление результатов воспроизведения активности и удельной активности методами $4\pi\gamma$ -счёта, методами $4\pi\beta$ - γ -совпадений, $4\pi\alpha$ - γ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений доказывает эквивалентность воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов различными методами, реализуемыми в эталоне ГЭТ 6-2016.

В пятой главе проведен выбор 8 радионуклидов (^{241}Am , ^{228}Th , ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{88}Y , ^{60}Co , ^{54}Mn) для вторичных эталонов – радионуклидных источников фотонного излучения, обеспечивающий перекрытие энергетического диапазона типовых гамма-спектрометров, а также достаточно большого периода полураспада выбранных радионуклидов и высокой интенсивностью гамма-квантов. Радионуклидные источники с выбранными радионуклидами используются для поверки 70 % всего количества выпускаемых в РФ точечных радионуклидных источников фотонного излучения. Испытания в целях утверждения типа средства измерений и определение метрологических характеристик радионуклидных источников типа ОСГИ-РТ, с применением разработанной автором методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта, проведено в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Источники типа ОСГИ-РТ обеспечивают наличие вторичных эталонов для

источников фотонного излучения государственной поверочной схемы с прослеживаемостью к эталону ГЭТ 6-2016.

В заключении приведены выводы и результаты работы, намечены перспективы дальнейших исследований.

Диссертационная работа является целостным, самостоятельным научным исследованием, отличающимся своей новизной:

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, $4\pi\beta\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений, реализуемыми в государственном эталоне ГЭТ 6-2016, посредством сличения установок с подтверждёнными в международных ключевых сличениях измерительными возможностями.

В диссертации сформулированы следующие научные 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 разбивке 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 $4\pi\beta\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\gamma$ -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.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается изложением материалов диссертационного исследования в 6 печатных работах, в том числе 5 статей опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК, а также представлением основных результатов на 8 научных конференциях.

Достоверность научных результатов диссертации подтверждается адекватностью применённой математической модели измерений, корректной инструментальной реализацией 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.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Во введении и в первой главе диссертации желательно было бы более подробно обосновать выбор гамма-спектрометрического метода определения активности радионуклидных источников.
2. В тексте первой главы не полностью представлена информация о критериальных требованиях и выборе для решения поставленных задач только двух типов гамма-спектрометров: сцинтилляционных и полупроводниковых. Отсутствуют сведения о других типах гамма – спектрометров.
3. В главе 3 приведены результаты исследований в течение двух лет стабильности энергетического разрешения в низкоэнергетической области спектра детекторов NaI(Tl) установки УЭА-7. Однако в тексте диссертации и автореферата отсутствуют количественные значения энергетического разрешения, полученные в ходе исследований, особенно по методу $4\pi\gamma$ -счёта при анализе результатов измерений аппаратурных спектров сложного состава.
4. В выражении для суммарной стандартной неопределенности (формула (28)) учитываются только стандартные неопределенности составляющих косвенного измерения активности радионуклида, но в соответствии с правилами по метрологии ПМГ 96-2009 в выражении суммарной стандартной неопределенности должны учитываться еще и значения расширенных неопределенностей составляющих косвенного измерения. Из текста диссертации не ясно, почему это не учитывается.

По тексту диссертации имеются редакционные замечания, так например:

1. На странице 3 в п.4.2 оглавления присутствует грамматическая ошибка.
2. На странице 5 в предложении «Существует потребность в повышении точности измерений гамма -излучающих радионуклидов» отсутствует параметр, точность измерений которого надо повышать.
3. На странице 15 в таблице 1 не указаны единицы измерения физических параметров. На этой же странице в выражении «Скорость счета импульсов в пике....» используется не технический термин «... в пике...».
4. На странице 54 по тексту при ссылке на рисунок 23 указано изображение траектории гамма-квантов для ^{57}Co , однако на рисунке представлен ^{241}Am .

Приведенные замечания не имеют принципиального значения и не снижают высокую оценку диссертации в целом.

Заключение

Диссертация Г.В. Жукова представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему. Работа удовлетворяет критериям "Положения о порядке присуждения учёных степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а её автор Г.В. Жуков заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

Официальный оппонент

Заместитель главного конструктора-
начальник научно-производственного
отделения ФГУП «ВНИИА»,
доктор технических наук, доцент

Д.Э. Эргашев

Подпись официального оппонента Дамира Эркиновича Эргашева заверяю

Ученый секретарь
НТС ФГУП «ВНИИА»,
кандидат технических наук



Л.В. Феоктистова

18.10.25