

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

В

Владимиров Даниил Анатольевич

**Численное моделирование нейтронных процессов методом Монте-Карло в счетчиках
нейтронных совпадений колодезного типа**

2.4.9 – ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2026

Работа выполнена в акционерном обществе «Высокотехнологический институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

**Научный
руководитель:**

Алеева Татьяна Борисовна

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры №5 «Теоретическая и экспериментальная физика ядерных реакторов» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

**Официальные
оппоненты**

Мантуров Геннадий Николаевич

доктор технических наук, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», отделение ядерных реакторов, департамент физики реакторов, главный научный сотрудник

Подлесный Максим Михайлович

кандидат физико-математических наук, Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, НЭОКС ИБР-2 ОНИРКС ЛНФ, научный сотрудник

Титаренко Юрий Ефимович

доктор физико-математических наук, профессор, Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», лаборатория фундаментальных ядерно-физических исследований, начальник лаборатории

Защита диссертации состоится «22» апреля 2026 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.2.02 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.2.02,
кандидат технических наук



Куликов Евгений Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В России осуществляется стратегия замкнутого топливного цикла, в рамках которой выделенный из отработавшего топлива плутоний будет использоваться в качестве сырья для изготовления нового уран-плутониевого смешанного топлива быстрых реакторов.

Разработка методов измерений массы и изотопного состава плутония является важной задачей с точки зрения нераспространения ядерного оружия, государственного учета и контроля ядерных материалов, контроля качества топлива, технологического контроля процессов его изготовления и переработки отработавшего топлива. Актуальной задачей является комплектация партий сырья – диоксида плутония для изготовления смешанного топлива. При этом неразрушающие методы имеют преимущество, так как разрушающие методы значительно более трудоемки, требуют вскрытия упаковок с диоксидом плутония и отбора представительной пробы.

Для изготовления топлива реактора БРЕСТ планируется использовать диоксид плутония, хранящийся на складе ПО «Маяк» в контейнерах массой около 3 кг. Методика неразрушающих измерений массы плутония предполагает применение метода счета нейтронных совпадений. Характеристики образца: большая масса плутония в контейнере, широкий диапазон изотопного состава, наличие легких примесей – существенно осложняют разработку методик измерения массы плутония данным методом и предъявляют особые требования к оборудованию. Актуальность темы исследования определяется необходимостью обеспечения достоверными данными системы государственного учета и контроля ядерных материалов и технологии изготовления уран-плутониевого топлива реакторов на быстрых нейтронах нового поколения с естественной безопасностью, разрабатываемых в рамках проекта «Прорыв».

За рубежом счет нейтронных совпадений получил развитие в виде метода множественности нейтронов, который в течение многих лет успешно применяется для контроля массы плутония в различных материалах, в том числе в скрапе и отходах. В России отечественные счетчики множественности нейтронов не изготавливаются.

В силу широкой номенклатуры образцов смешанного нитридного и оксидного топлива, РАО – различный химический состав, размеры, геометрия, неоднородность – изготовление и аттестация стандартных образцов для калибровки детекторов множественности для всех случаев практически невозможно. Поэтому актуальной является разработка расчетно-экспериментального метода анализа, позволяющего вносить в калибровочные коэффициенты поправки, зависящие от нейтронно-физических свойств анализируемых образцов, для минимизации числа стандартных образцов. В настоящей работе для этого используются методы математического моделирования Монте-Карло, позволившие разработать модель счетчика множественности в программной среде Serpent.

Целью диссертационной работы является разработка расчетно-экспериментального метода определения эффективной массы ^{240}Pu в образцах, содержащих плутоний в разных физико-химических формах, и конструкции счетчика множественности нейтронов для измерений контейнеров с диоксидом плутония ПО «Маяк».

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель счетчиков множественности нейтронов в программной среде SERPENT, позволяющую рассчитывать калибровочные коэффициенты метода множественности нейтронов с учетом их зависимости от свойств анализируемых образцов.
2. Разработать измерительную процедуру определения эффективной массы ^{240}Pu в образцах с разными физико-химическими свойствами, позволяющую минимизировать необходимое число стандартных образцов.
3. Исследовать влияние состава образца на результаты анализа.

4. Разработать конструкцию счетчика множественности нейтронов для измерений контейнеров с диоксидом плутония ПО «Маяк».

Научная новизна полученных в диссертации результатов:

1. В программной среде Serpent разработана математическая модель счетчиков множественности нейтронов, позволяющая рассчитывать калибровочные коэффициенты ММН с учетом их зависимости от свойств анализируемых образцов.
2. Впервые разработан и внедрен расчетно-экспериментальный метод измерения эффективной массы ^{240}Pu в образцах, содержащих плутоний различной физико-химической формы, с передачей калибровки от аттестованного объекта к исследуемому.
3. Впервые в программной среде Serpent построена модель «Измерительная система – контейнер ПО Маяк», позволяющая разработать конструкцию счетчика множественности нейтронов, предназначенного для измерений диоксида плутония в контейнере ПО Маяк.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанный в диссертационной работе расчетно-экспериментальный метод оценки влияния свойств образцов использован для уточнения метрологических характеристик, расширения диапазона измерений и номенклатуры анализируемых материалов по методике измерений № 7/393-2020 «Плутоний. Измерение эффективной массы изотопа плутония-240 методом множественности нейтронов». Методика измерений № 7/393-2020 с уточненными характеристиками аттестована, внедрена в систему измерений ядерных материалов АО «ВНИИНМ» и применяется для анализа оксидов, нитридов, топливных таблеток МОКС - и СНУП-топлива, скрапа в виде смесей порошков оксидов плутония и урана. Методика измерений № 7/393-2020 используется для контроля характеристик диоксида плутония, поступающего со склада в технологические цепочки изготовления экспериментального топлива Комплекса по отработке технологии уран-плутониевого оксидного смешанного топлива и Комплекса по изготовлению и исследованию высокоплотного топлива, а также для контроля отходов, образующихся при изготовлении таблеточного топлива, что подтверждено актом внедрения от 25.04.2025 № 26/77-акт.
2. Разработана конструкция Российского счетчика множественности нейтронов для измерений контейнеров с диоксидом плутония ПО «Маяк».

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель счетчиков множественности нейтронов в программной среде Serpent, позволяющая рассчитывать калибровочные коэффициенты ММН с учетом зависимости от свойств анализируемых образцов.
2. Методология измерения эффективной массы ^{240}Pu в образцах, содержащих плутоний различной физико-химической формы, в рамках комплексного метода, включающая процедуру корректировки калибровочных коэффициентов, установленных при измерениях со стандартными образцами из металлического плутония.
3. Результаты измерений эффективной массы ^{240}Pu для нитридов, оксидов и РАО, полученные по разработанной методике.
4. Конструкция российского счетчика множественности нейтронов для измерений контейнеров с диоксидом плутония ПО «Маяк».

Достоверность результатов диссертации обеспечивается:

1. Аттестацией методики измерений МВИ № 7/393–2020 «Плутоний. Измерение эффективной массы изотопа плутоний-240 методом множественности нейтронов», Свидетельство №5099/01.00044-2025.

2. Актом внедрения расчетно-экспериментального метода оценки метрологических характеристик методики измерения эффективной массы плутония-240 методом множественности нейтронов, № 26/77-акт.

Личный вклад автора

Все результаты диссертационной работы получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Лично автором проведены:

1. сбор и анализ литературных данных по теме исследования;
2. разработка численной модели счетчиков множественности нейтронов;
3. обоснование применения методов численного моделирования для определения калибровочных коэффициентов;
4. разработка нового расчетно-экспериментального метода анализа образцов, содержащих плутоний в разных физико-химических формах;
5. разработка конструкции перспективного российского счетчика множественности нейтронов РСМ-01.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих международных и российских научных конференциях, семинарах, школах:

- Молодежная научно-практическая конференция АО «ВНИИНМ» «Материалы и технологии в атомной энергетике» - Москва, АО «ВНИИНМ», 22 – 23 июня 2022 г.
- Международная конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга-2022» - Москва, НИЯУ МИФИ, 5 – 9 сентября 2022;
- X Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» - Москва, НИЯУ МИФИ 25 – 27 апреля 2023;
- Открытая научно-техническая конференция Молодежного движения Топливной компании ТВЭЛ «Science and Youth TVEL» - Томск, Томский политехнический университет, 14 – 19 августа 2023;
- Круглый стол отечественного Ядерного общества «История и перспективы ядерного топлива» - Электросталь, АО «МСЗ», 14 – 15 сентября 2023;
- X Всероссийский с международным участием Молодежный научный форум «OpenScience 2023» - Гатчина, ПИЯФ, 15 – 17 ноября 2023;
- Научно-технический семинар «Метрологическое обеспечение измерений РАО/упаковок РАО» - Москва, АО «ВНИИНМ», 28 марта 2024.
- Научно-практическая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (НЕЙТРОНИКА–2024)» - Обнинск, АО ГНЦ ФЭИ, 28 – 31 мая 2024.
- Неразрушающий анализ рабочего тела аттестованного объекта СНУП-топлива // Молодежная научно-практическая конференция АО «ВНИИНМ» «Материалы и технологии в атомной энергетике» - Москва, , АО «ВНИИНМ», 26 – 28 мая 2024
- Международная конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга-2024» - Москва, НИЯУ МИФИ, 2 – 6 сентября 2024

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, рекомендованных ВАК РФ:

По теме работы опубликованы 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, одна из которых индексируется в системе цитирования Scopus; 7 тезисов докладов на конференциях.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 161 страниц, включая 74 рисунка и 43 таблицы. Список литературы содержит 70 наименований.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности 2.4.9. – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

Диссертационная работа по своему содержанию соответствует пунктам:

1. Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации, а также снятии с эксплуатации;

2. Разработка экспериментальных методик и экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники;

7. Разработка методов проведения исследований, проектирования, а также научно-обоснованных технических решений в области атомного реакторостроения, машин, агрегатов, технологии материалов атомной промышленности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор литературы по изучаемой области, формулируется цель, ставятся задачи работы, обосновываются научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору литературы, систематизирующей данные о замкнутом ядерном топливном цикле и процессе фабрикации СНУП-топлива для реактора БРЕСТ-ОД-300, особенностях производства и хранения плутония, рассмотрены его физико-химические формы, а также требования, предъявляемые к методам измерения его характеристик. Это подчеркивает актуальность темы исследования в контексте контроля изотопного состава и массы плутония.

В настоящее время активно ведутся исследования и разработки в области ядерных технологий четвертого поколения, основанных на использовании быстрых реакторов. В рамках энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 года реализация замкнутого ЯТЦ является одним из приоритетных направлений. В проекте «Прорыв» ставятся амбициозные задачи по созданию инновационных решений в ядерной энергетике. Среди них — разработка реактора «БРЕСТ-ОД-300», обоснование его безопасности, создание нового нитридного топлива, а также усовершенствование методов переработки и утилизации радиоактивных отходов. Эти вопросы активно обсуждаются в научных публикациях, посвященных проекту и его реализации на ОДЭК. В качестве топлива для реактора «БРЕСТ-ОД-300» планируется использовать смешанное нитридное уран-плутониевое топливо (СНУП). Первоначальные загрузки будут производиться из запасов диоксида плутония, хранящегося на ПО «Маяк».

На текущий момент в гражданском секторе ядерной энергетики России накоплено свыше 180 тонн плутония. Накопленные запасы плутония представляют как значительный энергетический потенциал, так и серьёзные технологические и экологические вызовы, требующие комплексных решений. Наибольшее практическое значение в ядерном топливном цикле имеет диоксид плутония PuO_2 . Это наиболее стабильное кислородное соединение плутония, которое может быть получено различными способами: термическим разложением солей плутония (нитратов, оксалатов и др.), сжиганием металлического плутония или прокаливанием его низших оксидов и других соединений (гидрида, нитрида, карбидов). Диоксид плутония является сырьем для производства смешанного топлива быстрых реакторов. Актуальной задачей является комплектация партий сырья. Необходимо измерять массу и изотопный состав плутония в каждом контейнере для получения достоверных данных о среднем изотопном составе плутония в скомплектованной партии

растворения, который должен удовлетворять допуску. Для этого необходимо использовать неразрушающие методы анализа, такие как метод множественности нейтронов.

Вторая глава диссертационной работы посвящена систематическому анализу методов измерения плутония, охватывающему как разрушающие, так и неразрушающие методы анализа ядерных материалов. Отдельное внимание уделено рассмотрению нейтронметрических методов, таких как методы регистрации полного потока нейтронов, нейтронных совпадений и метод множественности нейтронов.

В настоящее время в лаборатории ядерно-физических исследований и измерений АО «ВНИИНМ» проводят измерения изотопного состава, уран-плутониевого отношения, тепловыделения и эффективной массы ^{240}Pu для контроля массы плутония в оксидах, нитридах, топливных таблетках МОКС и СНУП топлива, а также в отходах, смесях оксидов плутония и урана. Предъявляются высокие требования к точности измерений характеристик экспериментального уран-плутониевого топлива, в связи с чем применяется комплексный метод измерения, включающий совокупность измерений γ -спектрометрическим, калориметрическим и методом множественности нейтронов.

Метод множественности нейтронов, предложенный в 1990-х в Лос-Аламосе группой под руководством Норберта Энслина, является развитием метода двойных нейтронных совпадений. Основной принцип метода заключается в измерении не только двойных, но и совпадений высших порядков. Технически такая возможность появилась в результате развития быстрой электроники. По результатам измерений рассчитывают скорости счета нейтронных совпадений, которые встречаются один, два, или три раза - триплетов, тогда как в традиционном методе регистрации совпадений существует лишь такие параметры, как синглеты (единичные) и дублеты (двойные).

Метод счета нейтронных совпадений (множественности) позволяет определить эффективную массу ^{240}Pu (m_{eff}), которая равна сумме масс всех четных изотопов плутония в образце:

$$m_{\text{eff}} = (2,52^{238}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} + 1,68 ^{242}\text{Pu}) \quad (1)$$

$i\text{Pu}$ – масса i -го изотопа плутония.

Эффективную массу ^{240}Pu в образце определяют по скорости счета нейтронов спонтанного деления. Для измерений скорости спонтанных делений используют метод Росси-альфа, который реализуется с помощью регистра сдвига в составе комплекта счетчика множественности нейтронов. С его помощью регистрируют распределение множественности нейтронов и по нему рассчитывают скорости счета синглетов N_1 , дуплетов N_2 и триплетов N_3 . Данные параметры коррелируют с частотой спонтанных делений и двумя дополнительными характеристиками образца: коэффициентом умножения нейтронов утечки M и соотношением между количеством нейтронов от (α, n) -реакций и нейтронов спонтанного деления α . Эти зависимости описываются уравнениями точечной модели (2).

Формулы связывающие скорости счета синглетов N_1 , дуплетов N_2 и триплетов N_3 с параметрами образца – коэффициентом умножения нейтронов утечки M , скоростью спонтанных делений $S_{\text{сп}}$, параметром α – отношением числа (α, n) – нейтронов к числу нейтронов спонтанного деления имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} N_1 &= S_{\text{сп}} \cdot \varepsilon \cdot M \cdot \nu_{s1} \cdot (1 + \alpha) \\ N_2 &= \frac{S_{\text{сп}} \cdot \varepsilon^2 \cdot \chi \cdot M^2}{2} \cdot \left\{ \nu_{s2} + \left[\frac{M-1}{\nu_{i1}-1} \right] \cdot \nu_{s1} \cdot (1 + \alpha) \cdot \nu_{i2} \right\} \\ N_3 &= \frac{S_{\text{сп}} \cdot \varepsilon^3 \cdot \chi^2 \cdot M^3}{6} \cdot \left\{ \nu_{s3} + \left[\frac{M-1}{\nu_{i1}-1} \right] \cdot [3\nu_{s2} \cdot \nu_{i2} + \nu_{s1} \cdot (1 + \alpha) \nu_{i3}] + 3 \cdot \left(\frac{M-1}{\nu_{i1}-1} \right)^2 \cdot \nu_{s1} \cdot (1 + \alpha) \cdot \nu_{i2}^2 \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

где ε – эффективность регистрации нейтронов;

χ – коэффициент отбора совпадений;

факториальные моменты распределения нейтронов спонтанного деления табулированы:

$\nu_{s1} = 2,154$ - среднее число нейтронов в акте спонтанного деления ^{240}Pu ;

$\nu_{s2} = 3,789$ - второй момент распределения множественности нейтронов в акте спонтанного деления ^{240}Pu ;

$\nu_{s3} = 5,211$ - третий момент распределения множественности нейтронов в акте спонтанного деления ^{240}Pu ;

факториальные моменты распределения нейтронов вынужденного деления:

$\nu_{i1} = 3,163$ - среднее число нейтронов в акте вынужденного деления ^{239}Pu ;

$\nu_{i2} = 8,240$ - второй момент распределения множественности нейтронов в акте вынужденного деления ^{239}Pu ;

$\nu_{i3} = 17,321$ - третий момент распределения множественности нейтронов в акте вынужденного деления ^{239}Pu .

Целью анализа множественности нейтронов является точное измерение потока нейтронов спонтанного деления в отсутствие предварительной информации о матрице образца и о параметрах, обуславливающих вынужденное деление. Наличие третьего измеряемого параметра позволяет применять эту методику ко многим типам плутониевых материалов, включая оксид и нитрид плутония. Основной задачей при разработке счетчиков множественности нейтронов ставится достижение высокой эффективности регистрации нейтронов, для достижения приемлемой статистической погрешности скорости счета триплетов.

Данный метод обычно используется в комбинации с гамма-спектрометрическим методом, поскольку, зная изотопный состав плутония, определяемый по результатам гамма-спектрометрии, и его эффективную массу ^{240}Pu , можно определить общую массу плутония в образце по соотношению (3):

$$m_{pu} = m_{eff} / (2,52^{238}f + ^{240}f + 1,68^{242}f), \quad (3)$$

где if – массовая доля i -го изотопа в плутонии;

m_{pu} – масса плутония в образце.

Преимущества метода измерения множественности:

1) более высокая точность измерений, чем у традиционного метода нейтронных совпадений;

2) можно получить информацию о коэффициенте размножения нейтронов;

3) меньшее время измерения по сравнению с разрушающими методиками;

Недостатки метода измерения множественности:

1) стоимость детекторов множественности выше, чем классических детекторов совпадений;

2) по своим габаритам детекторы множественности более громоздкие, чем счетчики совпадений;

3) высокая эффективность регистрации приводит к большим поправкам на мертвое время, что снижает точность определения скорости счета;

4) расширенные требования к использованию сдвигового регистра – обработка высоких скорости счета ($\geq 10^6$ имп./с) и использование быстрой электроники для минимизации мертвого времени множественности на уровне 50 нс.

Ключевой особенностью метода является математическое разделение нейтронных потоков различного происхождения на основе анализа различий в их множественностях,

что позволяет выделить компоненту, соответствующую нейтронам спонтанного деления. Для регистрации нейтронов используются специальные измерительные системы с детектором колодезной конструкции, оснащенные регистром сдвига. Применение данной методики обеспечивает возможность определения массы плутониевых образцов в широком диапазоне - от нескольких миллиграммов до нескольких килограммов. Технология особенно эффективна при работе с образцами сложного состава или нестандартной геометрии, где традиционные методы измерения могут давать значительные погрешности.

В нейтронометрической части комплексный метод требует применения стандартных образцов, свойства которых близки к свойствам анализируемых объектов. Для снижения необходимого числа стандартных образцов в настоящее время развиваются методы расчетного моделирования. В диссертационной работе предложена и реализована методология передачи размера калибровочных коэффициентов (эффективности регистрации и коэффициента отбора совпадений) от аттестованного объекта металлического плутония к анализируемому образцу различной физико-химической формы с применением методов расчетного моделирования.

Нейтронные измерительные системы, в частности, счетчики нейтронных совпадений и счетчики множественности нейтронов, широко применяются в международной практике для учёта и контроля плутония, в области ядерной безопасности, нераспространения и переработки ядерных материалов. Рассмотрен мировой опыт по использованию счетчиков множественности нейтронов и сделан вывод о том, что накоплен большой опыт в вопросе разработки нейтронных измерительных систем, и наиболее перспективными системами для анализа плутоний содержащих материалов являются счетчики на основе надтепловой конструкции, что было учтено в настоящей работе.

Третья глава диссертационной работы посвящена описанию методов расчетного моделирования (Монте-Карло и дискретных ординат) и используемых программных комплексов Serpent и MCNPX.

Для решения задач численного моделирования нейтронных процессов был выбран программный комплекс Serpent, а для проверки корректности проведенных расчетов проведены параллельные расчеты в программной среде MCNPX. Программный комплекс MCNP признан международным эталоном для компьютерного моделирования процессов переноса нейтронного, фотонного и электронного излучений. Данное программное обеспечение находит широкое применение при разработке и верификации измерительных систем, используемых в сфере контроля ядерных материалов. Препятствием использования семейства программ MCNP является отсутствие лицензии в Российской Федерации на данное программное средство.

Среди альтернативных программных решений для моделирования ядерных процессов особое место занимает Serpent, разработанный специалистами финского исследовательского центра VTT. Данный программный продукт, аналогично MCNP, реализует метод Монте-Карло и предоставляет схожий функционал, включая расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов (k_{eff}). Serpent представляет собой универсальный инструмент для моделирования различных параметров нейтронных систем, таких как:

- коэффициенты размножения нейтронов (бесконечный и эффективный);
- изменение нуклидного состава;
- остаточное тепловыделение;
- многогрупповые константы;
- активация конструкционных материалов;
- кинетические характеристики реактора;
- средний поток нейтронов, время жизни нейтронов в системе, скорости реакций процессов.

Программа поддерживает создание двумерных и трехмерных моделей, что позволяет проводить полномасштабное моделирование активных зон реакторов с детализацией до отдельных элементов конструкции. Геометрическое моделирование в Serpent основано на комбинации элементарных поверхностей и их производных, формирующих сложные пространственные структуры. Анализ возможностей программного обеспечения Serpent подтверждает его эффективность для решения широкого круга задач реакторной физики. Программный комплекс Serpent по своим возможностям и характеристикам применим к разработке математической модели счетчика множественности нейтронов, а именно к расчету калибровочных коэффициентов – эффективности регистрации и коэффициента отбора совпадений, но прямое моделирование сдвигового регистра программной средой Serpent не поддерживается.

В четвертой главе диссертационной работы представлены разработанные модели счетчиков нейтронных совпадений AWCC и RENMC в программных комплексах Serpent и MCNPX, а также результаты верификации моделей на стандартных образцах плутония и радиоизотопных источниках нейтронов; приведена модель расчета калибровочных коэффициентов метода счета множественности нейтронов; разработана процедура корректировки калибровочных коэффициентов.

Целью разработанной математической модели счетчиков множественности нейтронов является расчет калибровочных коэффициентов – эффективности регистрации нейтронов и коэффициента отбора совпадений, с учетом их зависимости от нейтронно-физических свойств измеряемого образца. Согласно методике МВИ № 7/393-2020 «Плутоний. Измерение эффективной массы изотопа плутоний-240 методом множественности нейтронов» АО ВНИИНМ эффективность регистрации нейтронов определяется как отношение скорости счета к суммарной мощности источника (спонтанное деление, (α, n) -реакция, вынужденное деление) и рассчитывается по формуле

$$N_{lp} = \varepsilon_p \left[v_{сп} S_{сп} (1 + \alpha_p) + v_f S_f \right], \quad (4)$$

где $v_{сп}$ — среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления; v_f — среднее число нейтронов на один акт вынужденного деления; S_f — скорость вынужденного деления, c^{-1} . $S_{сп}$ — скорость спонтанных делений, c^{-1} , α_p — отношение числа (α, n) – нейтронов к числу нейтронов спонтанного деления;

Коэффициент отбора совпадений¹ рассчитывали по среднему времени жизни нейтронов в установке τ :

$$\chi_p = \exp(-P/\tau)(1 - \exp(-T/\tau)) \quad (5)$$

Соотношение (5) характеризует вероятность регистрации пары нейтронов единичного акта деления во временном интервале совпадений T с предварительной задержкой P .

Время жизни рассчитывается по уравнению баланса нейтронов в стационарном состоянии:

$$\tau = \frac{\int_E \int_V \Phi(r, E) dV dE}{v(v_{сп} S_{сп} (1 + \alpha_p) + v_f S_f - S_y)}, \quad (6)$$

где $\Phi(r, E)$ — поток нейтронов в системе, $1/cm^2 \cdot c$; v — средняя скорость нейтрона в системе, cm/c ; $v_{сп} S_{сп} (1 + \alpha_p) + v_f S_f$ — полный источник (спонтанное деление, (α, n) -реакция, вынужденное деление), c^{-1} ; S_y — утечка нейтронов из детектора, c^{-1} .

¹Коэффициент отбора совпадений – это величина, равная отношению доли нейтронов двойных совпадений во временных воротах конечной ширины к доле нейтронов двойных совпадений в воротах бесконечной ширины; время жизни нейтрона в установке – это среднее время от испускания нейтрона до его поглощения или вылета из установки.

Обоснование работоспособности математической модели проводилось путем сравнения результатов моделирования и экспериментов со следующими образцами:

Модель счетчика AWCC верифицирована на следующих источниках нейтронов:

1) пять образцов металлического плутония из комплекта АО 95 505/531-44—2021 без чехла и в свинцовом чехле с толщиной стенки 2 мм при расположении источника нейтронов в центре измерительной полости.

2) четыре образца диоксида плутония из комплекта ГСО 8454—2003 массой 3,2 г при расположении источника нейтронов в центре измерительной полости. Проведено 4500 калибровочных измерений по 30 с.

3) источник ^{252}Cf ММ-214 (США) при семи положениях по высоте относительно дна измерительной полости детектора. Проведено 100 измерений длительностью по 60 с.

4) источник ^{238}Pu —Ве ИБН-8-2 (ПО «Маяк») при семи положениях по высоте относительно дна измерительной полости детектора. Проведено 100 измерений длительностью по 60 с.

5) PuO_2 при положении источника в центре измерительной полости. Проведено 100 измерений длительностью по 30 с.

По программе Serpent рассчитывали коэффициент размножения нейтронов k_p и скорость следующих процессов: поглощение нейтронов в ^3He -счетчиках (скорость счета нейтронов N_{1p}), (n, f) -реакция вынужденного деления в источнике, рождение нейтронов вынужденного деления, (n, γ) -реакция поглощения в источнике, утечка нейтронов, средний поток нейтронов, средняя скорость нейтронов в системе. Стандартное отклонение расчета скоростей процессов и коэффициента размножения не превышало 0,7 и 1% соответственно. По результатам численного расчета скоростей реакций оценивали эффективность регистрации нейтронов ε_p , коэффициент умножения нейтронов утечки M_p и время жизни нейтронов в установке.

В экспериментах измеряли скорости счета одиночных нейтронов N_{1z} , двойных N_{2z} и тройных N_{3z} нейтронных совпадений. Были выполнены оценки экспериментальных значений по многократным измерениям по методике МВИ № 7/393—2020 «Плутоний. Измерение эффективной массы изотопа плутоний-240 методом множественности нейтронов»: ε_z и χ_z , α_z , коэффициента умножения нейтронов утечки из образца M_z (отношение числа вылетевших из образца нейтронов к числу нейтронов, родившихся в первичных событиях – в результате спонтанного деления и (α, n) - реакции).

Сравнение показало, что расхождение рассчитанной по программе Serpent и экспериментальной скорости счета нейтронов от плутониевых образцов не более 6%. Расхождение до 10% для радиоизотопных источников нейтронов объясняется погрешностью паспортных данных на мощность источника, которая составляла 10%. Различие расчетного и измеренного значения коэффициента умножения нейтронов не превышает 3%. Рассчитанные и измеренные коэффициенты отбора совпадений согласуются в пределах экспериментальной погрешности $\approx 10\%$.

Таблица 1. Результаты верификации модели счетчика AWCC

Источник	Отношение расчетных и экспериментальных скоростей счета, отн.ед.	
	Serpent/MCNPX	Serpent/Experiment
АО-106	1,02	1,04 ($\delta=0,9\%$)
АО-206	1,02	1,06 ($\delta=0,4\%$)
АО-306	1,02	1,06 ($\delta=0,4\%$)
АО-406	1,02	1,06 ($\delta=0,5\%$)
АО-506	1,02	1,06 ($\delta=0,5\%$)
ГСО-1	1,02	1,05 ($\delta=0,6\%$)
ГСО-2	1,02	1,02 ($\delta=0,3\%$)
ГСО-3	1,02	1,03 ($\delta=0,2\%$)
ГСО-4	1,02	1,04 ($\delta=0,2\%$)
^{252}Cf	1,02	1,10 ($\delta=10\%$)
$^{238}\text{Pu-Be}$	1,02	1,10 ($\delta=11\%$)

Счетчик RENMC (рисунок 1), основной счетчик, использующийся в лаборатории ядерно-физических измерений для анализа плутониевых материалов, – это счетчик колодезного типа с измерительной полостью диаметром 24 см. Данный счетчик обладает более высокой эффективностью и более коротким временем затухания отклика детектора (меньшим временем жизни нейтронов) по сравнению с традиционными счетчиками. Этот эффект достигается за счет более высокого давления в ^3He -детекторах, меньшей толщины слоя полиэтилена и наличия нескольких колец детекторов.

В счетчике имеются 115 газоразрядных счетчиков с ^3He под давлением 10 атмосфер диаметром 2,45 см и активной длиной 76 см, вставленных в полиэтиленовую матрицу. Число счетчиков в 1-ом (от полости), 2-ом, 3-ем, 4-ом кольцах составляет 24, 30, 29, 32 соответственно. Счетчик имеет 26 счетных каналов, в каждом из которых задействованы от 3 до 6 счетчиков с ^3He , соединенных с каждым каналом усилителя «Amptek». Между полиэтиленовой матрицей со счетчиками с ^3He и измерительной полостью расположен слой кадмия, который поглощает образующиеся в полиэтилене тепловые нейтроны, предотвращая тем самым их возвращение в измеряемый образец и индуцирование дополнительных актов деления. Сверху и снизу измерительной полости расположены графитовые торцевые заглушки толщиной в 15,2 см, предназначенные для уменьшения утечки нейтронов из полости. Дополнительный слой кадмия окружает полиэтиленовую матрицу со счетчиками с ^3He снаружи, между слоем кадмия и стенкой корпуса счетчика находится не менее 5 см полиэтилена. Для счета совпадений использован блок электроники AMSR (усовершенствованный сдвиговый регистр множественности). В качестве программного обеспечения счетчика множественности нейтронов применяется русифицированная версия программы обработки измерений нейтронных совпадений INCC 1.0x. Во всех экспериментах ширина ворот совпадений была установлена $T=32$ мкс, предварительная задержка $P=2$ мкс.

Калибровочные коэффициенты предустановлены на основании калибровки по калифорнию: коэффициент отбора совпадений $\chi = 0,651$, эффективность регистрации нейтронов $\varepsilon = 0,579$.

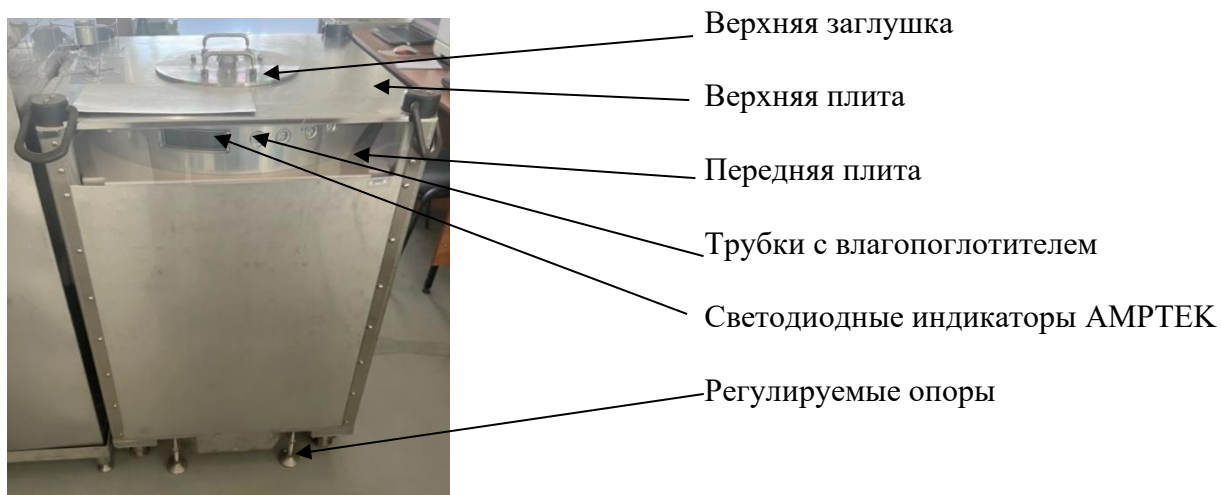


Рис. 1. Счетчик RENMC

Были проведены эксперименты и расчеты со следующими образцами:

- 5-ью образцами металлического плутония из комплекта АО 95 505/531–44–2021 без чехла и с образцами АО 95 505/531–44/406 и АО 95 505/531–44/506 в свинцовом чехле с толщиной стенки 2 мм. С образцами без чехла проведено 5000 калибровочных измерений, с образцами с чехлом проведено 2600 калибровочных измерений длительностью 30 с каждое;

- стандартным образцом металлического плутония СП-1, аттестованным по потоку нейтронов. Проведено 1400 калибровочных измерений по 30 с каждое;

- 2-мя образцами диоксида плутония из комплекта ГСО 8454–2003 массой 3,2 г – ГСО-03.1.02 и ГСО-03.4.02. Проведено 2600 калибровочных измерений по 30 с. Приведены рассчитанные по аттестованному изотопному составу и массе плутония значения.

- 3-мя упаковками из ТУК-30 с диоксидом плутония ПО «Маяк», в дальнейшем именуемые «Маяк-1», «Маяк-2», «Маяк-3», с массами диоксида плутония 1962 г, 3107 г, 3353 г. Для указанных контейнеров проведено 2600 калибровочных измерений по 30 с.

- 5-ью контейнерами ВНИИНМ с диоксидом плутония ПО «Маяк», перетаренным из контейнера «Маяк-1» послойно, в дальнейшем именуемые «П-1», «П-3», «П-4», «П-9», «П-11» с массами диоксида плутония примерно по 150 г каждый. Для контейнеров П-1 и П-11 проведено 2600 калибровочных измерений по 30 с. Для контейнеров П-3, П-4 и П-9 проведено 100 измерений по 30 с. Во всех контейнерах ВНИИНМ присутствовала поглощающая вставка из борированного полиэтилена.

Модель счетчика RENMC, построенная в SERPENT, представлена на рис 2, 3. Спектр и выход нейтронов (α , n)-реакций рассчитывались по программе NEDIS 2.0. Рассчитанный по NEDIS 2.0 спектр задавался в SERPENT как внешний источник.

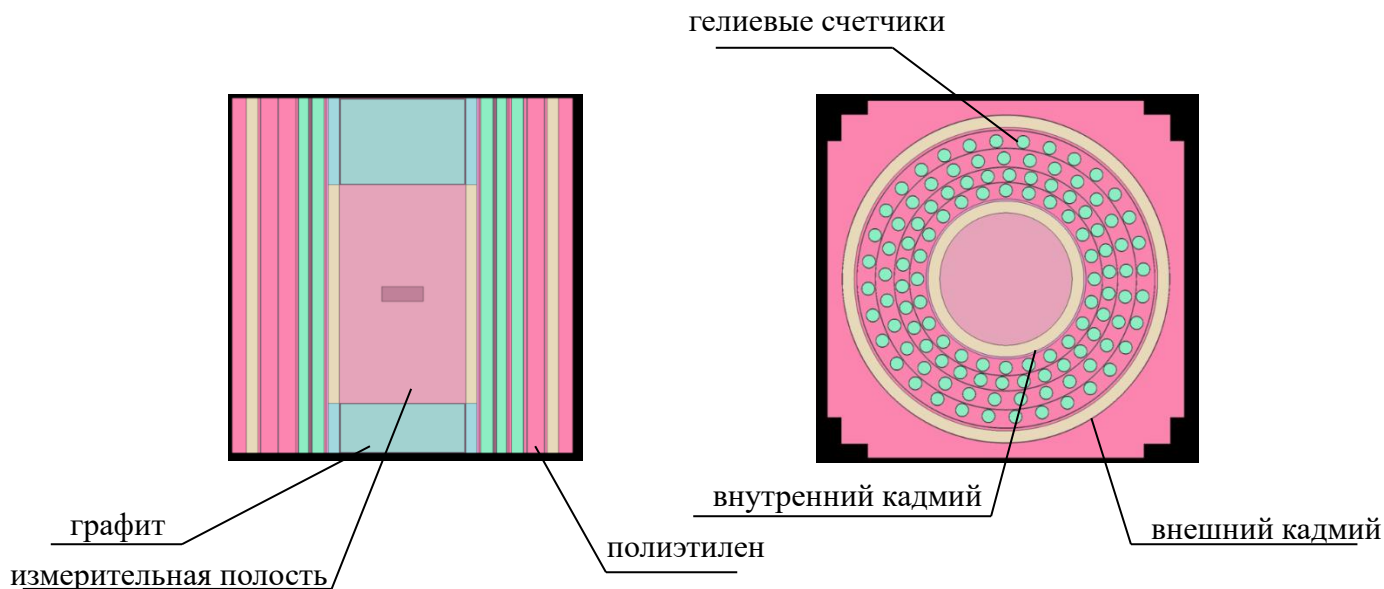


Рисунок 2 – построенная при помощи программного комплекса Serpent геометрия счетчика RENMC в разрезе

Рисунок 3 – построенная при помощи программного комплекса Serpent геометрия счетчика RENMC в виде сверху

Результаты верификации представлены в таблице 2 и показывают расхождение расчетных и измеренных скоростей счета в пределах 3%, что подтверждает работоспособность созданной модели. Расхождения эффективности регистрации – 5%, коэффициента отбора совпадений – в пределах экспериментальной погрешности 10%

Таблица 2. Результаты верификации модели счетчика RENMC

Источник	Serpent/Experiment, отн.ед.
АО-106 без чехла	1,01 ($\delta=0,9\%$)
АО-206 без чехла	1,02 ($\delta=0,4\%$)
АО-306 без чехла	1,02 ($\delta=0,4\%$)
АО-406 без чехла	1,01 ($\delta=0,5\%$)
АО-506 без чехла	1,02 ($\delta=0,5\%$)
АО-406 в чехле	1,02 ($\delta=0,5\%$)
АО-506 в чехле	1,02 ($\delta=0,5\%$)
ГСО-03.1.02	0,99 ($\delta=0,6\%$)
ГСО-03.4.02	0,99 ($\delta=0,2\%$)
СП-1	1,04 ($\delta=3,0\%$)
П-1	1,02 ($\delta=1,8\%$)
П-3	1,01 ($\delta=1,7\%$)
П-4	1,01 ($\delta=1,8\%$)
П-9	1,02 ($\delta=1,7\%$)
П-11	1,02 ($\delta=1,7\%$)
Маяк-1	1,02 ($\delta=1,7\%$)
Маяк-2	1,02 ($\delta=1,7\%$)
Маяк-3	1,01 ($\delta=1,7\%$)

После верификации моделей счетчиков AWCC и RENMC разработана процедура корректировки калибровочных коэффициентов, которая состоит в корректировке экспериментальных калибровочных коэффициентов анализируемых образцов при помощи расчетной модели.

К смещению результатов измерений приводят различия свойств калибровочного (стандартного) и анализируемого образцов. Корректировка этого смещения путем передачи размера калибровочных коэффициентов (эффективности регистрации и коэффициента отбора совпадений) от стандартного образца к анализируемому проводилась по аналогии с алгоритмом ОСТ 95 10597 с использованием в качестве модели сравнения математической модели, построенной в программной среде Serpent по формулам:

$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ст}} \cdot \varepsilon_{\text{р}} / \varepsilon_{\text{р ст}}$ и $\chi = \chi_{\text{ст}} \cdot \chi_{\text{р}} / \chi_{\text{р ст}}$, где ε , χ – калибровочные коэффициенты с поправкой; $\varepsilon_{\text{ст}}$, $\chi_{\text{ст}}$ – экспериментальные калибровочные коэффициенты для стандартного образца; $\varepsilon_{\text{р}}$, $\chi_{\text{р}}$ – расчетные калибровочные коэффициенты для анализируемого образца; $\varepsilon_{\text{р ст}}$, $\chi_{\text{р ст}}$ – расчетные калибровочные коэффициенты для стандартного образца

Для обоснования применимости скорректированных калибровочных коэффициентов были выполнены расчеты эффективной массы ^{240}Pu образцов металлического плутония АО 95 505/531-44—2021 для счетчиков AWCC и RENMC по измеренной скорости счета совпадений. В качестве стандартного выбран образец АО 95 505/531-44/106. Следует обратить внимание, что масса плутония в образце АО 95 505/531-44/106 2,24 г сильно отличается от массы плутония в образцах АО 95 505/531-44/506 – 160,93 г и от массы плутония в контейнерах ТУК-30 - до 3 кг.

Результаты расчетов показали, что для всех рассмотренных вариантов эффективная масса ^{240}Pu , оцененная с использованием скорректированных калибровочных коэффициентов, лучше соответствует опорным значениям – расхождения для всех типов образцов не превышают 5%.

Пятая глава диссертационной работы посвящена расчетно-экспериментальной оценке смещения результатов измерений эффективной массы ^{240}Pu в зависимости от вида анализируемого материала – оксиды, нитриды, РАО и от влияющих факторов. Оценка основана на процедуре корректировки калибровочных коэффициентов.

Расчетно-экспериментальный метод корректировки калибровочных коэффициентов на практике был использован для оценки смещения результатов измерений эффективной массы ^{240}Pu из-за различий нейтронных свойств анализируемых образцов от свойств аттестованных объектов металлического плутония, по которым была выполнена калибровка счетчика RENMC. В качестве анализируемых образцов рассматривались материалы, полученные при изготовлении экспериментального уран-плутониевого смешанного топлива в АО «ВНИИНМ». В табл. 3 представлены оцененные значения смещения результатов измерений эффективной массы ^{240}Pu . Перечень проанализированных образцов включает:

- стандартные образцы изотопного состава плутония в диоксиде плутония «ГСО – 1»
- индекс стандартного образца в составе комплекта 1, «ГСО – 4» - индекс стандартного образца в составе комплекта 4
- диоксид плутония в упаковке ТУК-30 «Маяк-1» (в табл. 3 приведены значения массы плутония, оцененной по результатам исследований, эффективная масса плутония-240 измерена нейтронометрическим методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 406);
- диоксид плутония в стальном контейнере «Контейнер» (в табл. 3 приведены значения массы плутония и эффективной массы ^{240}Pu , измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106);

- образцы СНУП-топлива и СНУП-топлива с примесями в пластиковых контейнерах (в табл. 3 приведены значения массы плутония и эффективной массы ^{240}Pu , измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106);

- образцы МОКС-топлива и МОКС-топлива с примесями в пластиковых контейнерах (в табл. 3 приведены значения массы плутония и эффективной массы плутония-240, измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106);

- скрап в виде смешанных оксидов урана и плутония (в табл. 3 приведены значения массы плутония и эффективной массы ^{240}Pu , измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106).

Смещение оценивали по разности между скорректированной эффективной массой ^{240}Pu и массой до корректировки, кроме образцов ГСО – 1 и ГСО – 4, для которых в качестве опорного принимали значение, рассчитанное по аттестованным характеристикам.

Расширенную относительную неопределенность с коэффициентом охвата 2 (доверительной вероятностью 0,95) результата измерения эффективной массы ^{240}Pu рассчитывают в соответствии с руководством ЕВРАХИМ/СИТАК "Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях" по формуле (6):

$$U = 2u_c, \quad (6)$$

где u_c – суммарная неопределенность.

Суммарную неопределенность измерений эффективной массы плутония-240 рассчитывают по формуле (7):

$$u_c = \sqrt{u_B^2 + u_K^2 + u_{cx}^2}, \quad (7)$$

u_K – стандартная неопределенность калибровки детектора множественности, которая оценивается по типу А при калибровке детектора;

u_{cx} – стандартная неопределенность сходимости измерений, которая оценивается по типу А по результатам многократных (не менее 100) измерений;

Стандартную неопределенность измерений эффективной массы плутония-240 по типу В рассчитывают по формуле (8):

$$u_B = \sqrt{b_{method}^2 / 3 + b_{bias}^2 / 3 + (u_{st})^2}, \quad (8)$$

u_{st} – стандартная неопределенность эффективной массы ^{240}Pu в образце, по которому проводилась калибровка. Ее оценивают по типу В по данным свидетельства об аттестации образцов металлического плутония.

Остальные составляющие смещения оценивают по типу В по результатам настоящей работы:

$b_{method} = 1,5\%$ - максимальное смещение, связанное с точностью метода корректировки калибровочных коэффициентов

$b_{bias} = 3\%$ - максимальное смещение, связанное с отличием анализируемого диоксида плутония, МОКС-топлива и скрапа от металлического калибровочного образца

$b_{bias} = 2\%$ - максимальное смещение, связанное с отличием анализируемого СНУП-топлива от металлического калибровочного образца

Таблица 3. Оценка влияния состава на смещение

№	Материал	Обозначение образца	Масса Pu, г	Эфф. масса ^{240}Pu , г	Смещение, %
1	Диоксид плутония, порошок	ГСО-1	2,819±0,008	0,1637±0,0010	-1,77
2	Диоксид плутония, порошок	ГСО-4	2,819±0,008	0,5920±0,0010	-1,49
3	Диоксид плутония, порошок	Маяк-1	1720±11	72,4±1,7	-3,00
4	Диоксид плутония, порошок	Контейнер	132,3±1,4	5,41±0,08	-1,43
5	СНУП, (U,Pu,Np)N топливные таблетки	СО СНУП	11,96± 0,12	0,5085± 0,008	+1,75
6	СНУП, (U,Pu,Np,Am)N, порошок	РТ-393	20,25±0,45	0,861±0,010	+1,32
7	СНУП, (U,Pu,Np)N, топливные таблетки	154А	40,5±0,5	1,697±0,024	+1,31
8	СНУП, (U,Pu, Np)N, топливные таблетки	154-ч2	68,0±1,1	2,875±0,040	+1,51
9	СНУП, (U,Pu,Np)N, топливные таблетки	155-ч1	98,1±1,2	4,14±0,06	+1,7
10	СНУП, (U,Pu)N с примесями, топливные таблетки	ОБ-1	10,28±0,11	0,472±0,007	+0,31
11	СНУП, (U,Pu,Am)N с примесями, топливные таблетки	A1112-9	17,96±0,19	1,900±0,030	-0,85
12	СНУП, (U,Pu,Am)N с примесями, топливные таблетки	T24	17,81±0,21	1,904±0,030	-1,34
13	СНУП, (U,Pu,Am)N с примесями, топливные таблетки	2М	18,87±0,40	2,048±0,030	-1,70
14	МОКС, (U,Pu)O ₂ , топливные таблетки	ОБ-5	14,11±0,15	0,586±0,009	-2,79
15	МОКС, (U,Pu,Am)O ₂ , порошок	A1112-C	17,80±0,35	1,863±0,030	-2,53
16	МОКС, (U,Pu,Am)O ₂ , порошок	В4	20,0±0,6	2,1±0,8	-2,36
17	МОКС, (U,Pu)O ₂ , топливные таблетки	M1122-Ok	15,6±1,0	0,652±0,010	-2,92
18	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-1	49,4±1,0	2,28±0,14	-1,90
19	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-2	54,8±1,1	2,51±0,15	-2,48
20	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-3	41,5±1,0	1,98±0,15	-2,39
21	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-4	61,6±1,0	3,01±0,16	-2,51
22	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-5	23,4±0,9	1,13±0,24	-2,24
23	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-6	11,7±1,0	0,58±0,45	-2,43

Таким образом, с использованием расчетно-экспериментального метода определения эффективной массы ^{240}Pu в образцах различной физико-химической формы, основанного на математической модели счетчика RENMC и комплексном методе измерений, выполнена оценка смещения результатов измерений эффективной массы ^{240}Pu для образцов диоксида плутония, МОКС-топлива, скрапа, СНУП-топлива. Оценка смещения выполнена в диапазоне значений коэффициента умножения нейтронов утечки до 1,272 и в диапазоне значений эффективной массы ^{240}Pu до 70 г. Результаты работы внедрены в аттестованную методику АО «ВНИИНМ» МВИ №7/393-2020 «Плутоний. Измерение эффективной массы изотопа плутоний-240 методом множественности нейтронов», Свидетельство

№5099/01.00044-2025, и применяются для оценки эффективной массы ^{240}Pu в образцах металлического плутония, смешанного нитридного и оксидного топлива, РАО.

Внедрение расчетно-экспериментального метода позволило:

- 1) расширить диапазон измерений эффективной массы ^{240}Pu в 9 раз – от 8,27 г до 70 г;
- 2) уточнить метрологические характеристики методики АО «ВНИИНМ» для различных образцов смешанного топлива;
- 3) уменьшить погрешности измерения эффективной массы ^{240}Pu в РАО и скрапах по сравнению с предыдущей версией методики ВНИИНМ и по сравнению с методикой ПО «Маяк» - таблица 4;

Таблица 4. Сравнение погрешности измерения эффективной массы ^{240}Pu в скрапах и РАО по методикам АО «ВНИИНМ» и ПО «Маяк»

Полная относительная погрешность по старой методике АО «ВНИИНМ», %	Полная относительная погрешность по новой методике АО «ВНИИНМ», %	Полная относительная погрешность по методике ПО «Маяк», %
8,5	4,1	14

- 4) включить контейнеры с диоксидом плутония в номенклатуру измеряемых по методике ВНИИНМ образцов. В таблице 5 приведено сравнение погрешности методики АО «ВНИИНМ» с методикой ПО «Маяк».

Таблица 5. Сравнение погрешности измерения эффективной массы ^{240}Pu в контейнерах с диоксидом плутония по методикам АО «ВНИИНМ» и ПО «Маяк»

Полная относительная погрешность по новой методике АО «ВНИИНМ», %	Полная относительная погрешность по методике ПО «Маяк», %
4,1	10

Шестая глава диссертационной работы посвящена разработке конструкции перспективного российского счетчика множественности нейтронов РСМ-01 для измерений контейнеров с диоксидом плутония ПО "Маяк.

Прототип Российской счетчика множественности разрабатывался для измерений контейнеров ПО «Маяк», содержащих около 3 кг диоксида плутония. В качестве прототипа для оптимизации конструкции был выбран счетчик множественности надтепловых нейтронов RENMC. Счетчики на основе регистрации надтепловых нейтронов обладают рядом преимуществ по сравнению с тепловой системой за счет уменьшения времени затухания отклика детектора, что снижает число случайных совпадений и повышает прецизионность измерения счета множественности.

Разработка конструкции установки проводилась с учетом предъявляемых требований к эффективности регистрации, времени затухания отклика детектора (времени жизни нейтрона), просчетам скоростей счета, количеству счетчиков и стоимости установки.

Основные характеристики диоксида плутония, загружаемого в контейнер ПО «Маяк»:

- 1) масса диоксида плутония от 1500 до 3300 г
- 2) скорость генерации нейтронов 10^5 - $5 \cdot 10^6$ н/с
- 3) параметр α (измеренное значение) изменяется от 1 (норма) до 8 (остатки неразложившегося оксалата и влага)
- 4) накопление влаги в среднем до 1,0 % по массе за 6÷7 лет. При хранении контейнеров более 20 лет отмечен привес до 3,5%.

- 5) содержание фтора с массовой долей до $10^{-3}\%$
- 6) насыпная плотность порошков диоксида плутония изменяется от 1,34 до 1,87 г/см³
- 7) диапазон изменения изотопного состава приведен в таблице 4

Таблица 4. Диапазон изменений изотопного состава плутония

Изотоп плутония	Диапазон массовой доли изотопа в плутонии, в %	
	ВВЭР	БН
²³⁸ Pu	От 0,2 до 2,1	От 0,05 до 0,25
²³⁹ Pu	От 54,0 до 82,0	От 94,5 до 98,5
²⁴⁰ Pu	От 15,5 до 24,0	От 1,7 до 4,8
²⁴¹ Pu	От 2,0 до 11,5	От 0,03 до 0,5
²⁴² Pu	От 1,0 до 11,5	От 0,01 до 0,1

- 8) средний размер частиц изменяется от единиц мкм до 40 мкм, в среднем 7 мкм.
- 9) высота засыпки от 7,6 см до 23,3 см
- 10) коэффициент умножения нейтронов утечки от 1,10 до 1,15;

Контейнер, содержащий 3 кг диоксида плутония, является мощным источником нейтронов (до $5 \cdot 10^6$ н/с), что необходимо учитывать при оптимизации конструкции измерительной системы. С одной стороны, для уменьшения статистической погрешности результатов измерения скорости счета тройных совпадений требуется высокая эффективность регистрации нейтронов, с другой стороны, для контейнеров ПО «Маяк» высокая эффективность приведет к большим поправкам на мертвое время, что снизит точность определения скорости счета и может привести к существенному смещению результатов измерений. Таким образом важной задачей является определение оптимальной эффективности регистрации нейтронов.

Исходя из проведенных исследований, выдвинуты основные требования к конструкции счетчика множественности нейтронов, предназначенного для измерений контейнеров с диоксидом плутония ПО «Маяк» методом множественности нейтронов.

1. Тип системы и время жизни нейтронов τ .

Для снижения числа случайных совпадений и повышения прецизионности измерения счета множественности выбрана надтепловая система. Оптимальное значение времени жизни нейтронов определяется соотношением $G \approx 1,257\tau$, где $G = 32$ мкс – ширина ворот совпадений. Значение τ должно составлять $\approx 25,5$ мкс.

2. Эффективность регистрации нейтронов должна составляет от 30 до 40%, что обеспечит статистическую погрешности скорости счета триплетов на уровне 0,1% за время измерения 1000 с и позволит минимизировать поправки на мертвое время.

3. Размер измерительной полости.

Минимальный диаметр полости, в которую возможно разместить контейнер, составляет 20 см. Для удобного позиционирования контейнера диаметр полости должен составлять не менее 22 см. Минимальная высота полости должна составлять не менее 40 см.

4. Минимизация стоимости.

Основная стоимость измерительной системы складывается из стоимости ³He-счетчиков и быстрой электроники – регистра сдвига. Стоимость конструкции может быть минимизирована за счет уменьшения числа счетчиков и их активной длины.

Рассмотрены следующие типы конструкции счетчика:

- два типа геометрии внешнего полиэтилена – кубическая и цилиндрическая;
- три типа кольцевой структуры счетчиков – 4 кольца счетчиков, 3 кольца и 2 кольца;
- разное количество замедлителя – количество замедлителя варьировалось при изменении диаметра и высоты измерительной полости, количества и активной длины ³He-счетчиков;

- диаметр измерительной полости менялся от 16 см до 26 см;
- высота измерительной полости менялась от 40,5 см до 50,5 см;
- рассмотрено различное давление в счетчиках – проведены расчеты при давлении 10 атм и 4 атм;
- рассмотрены счетчики разных моделей с различной активной длиной – 76 см, 53,5 см, 43,5 см, 26,5 см;
- проведена оценка влияния толщины внешнего полиэтилена на эффективность регистрации и время жизни нейтронов;
- рассмотрены варианты с различной толщиной стенки измерительной полости и материала покрытия измерительной полости;
- рассмотрены разные варианты материала торцевых заглушек – полиэтилен и графит.

На основе проведенных расчетных работ предложен следующий вариант конструкции российского счетчика множественности нейтронов РСМ-01.

Цилиндрическая геометрия, толщина внешнего полиэтилена 5 см, три кольца счетчика количеством 75 единиц с активной длиной 53,5 см, давлением 4 атм., работающих в пропорциональном режиме. Внутренний и внешний диаметр кольца полиэтилена с размещенными внутри счетчиками: 27,4 см и 46,6 см соответственно. Диаметр измерительной полости 22 см, высота измерительной полости 40,5 см. В качестве материала покрытия измерительной полости предлагается использовать сталь, под которой находится слой кадмия толщиной 4-8 мм. Материал торцевых заглушек – графит толщиной 16,4 см. Итоговые характеристики: эффективность регистрации нейтронов – 0,374, время жизни нейтрона – 25,8 мкс.

В таблице 5 приведено сравнение основных характеристик РСМ-01 со счетчиками АWCC и RENMC. Видно, что характеристики РСМ-01 соответствуют надтепловым системам. Полученная эффективность достаточна для обеспечения малой статистической погрешности скорости счета тройных совпадений при измерениях больших образцов плутония. На рисунках 4 и 5 приведена геометрия оптимизированной системы.

Таблица 5. Сравнение характеристик РСМ-01 и RENMC, АWCC

Параметр	АWCC	РСМ-01	RENMC
Диаметр измерительной полости, см	22,0	22,0	26,0
Высота измерительной полости, см	32,5	40,5	50,0
Количество ^3He -счетчиков	42	75	115
Давление в счетчиках, атм.	4	4	10
Эффективность регистрации, отн.ед.	0,310	0,374	0,579
Время жизни нейтрона, мкс	52,0	25,8	24,8
Средняя энергия нейтрона в системе, эВ	0,57	3,38	4,06

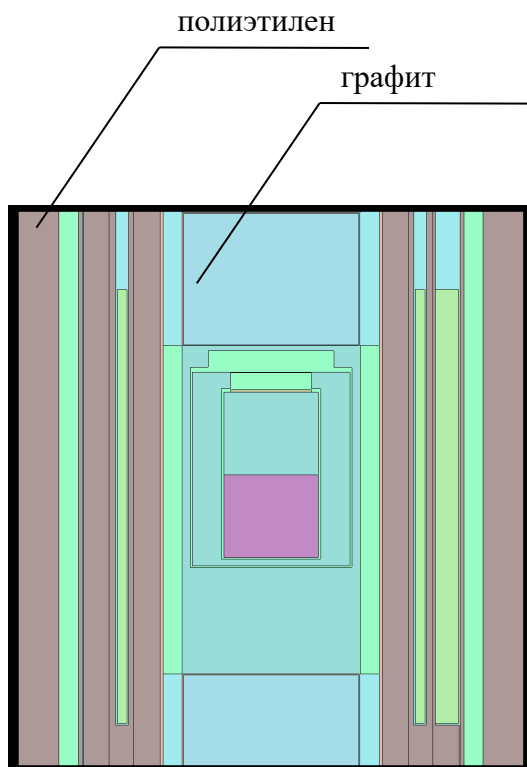


Рисунок 4 – модель счетчика РСМ-01 в программном комплексе Serpent (фронтальный разрез)

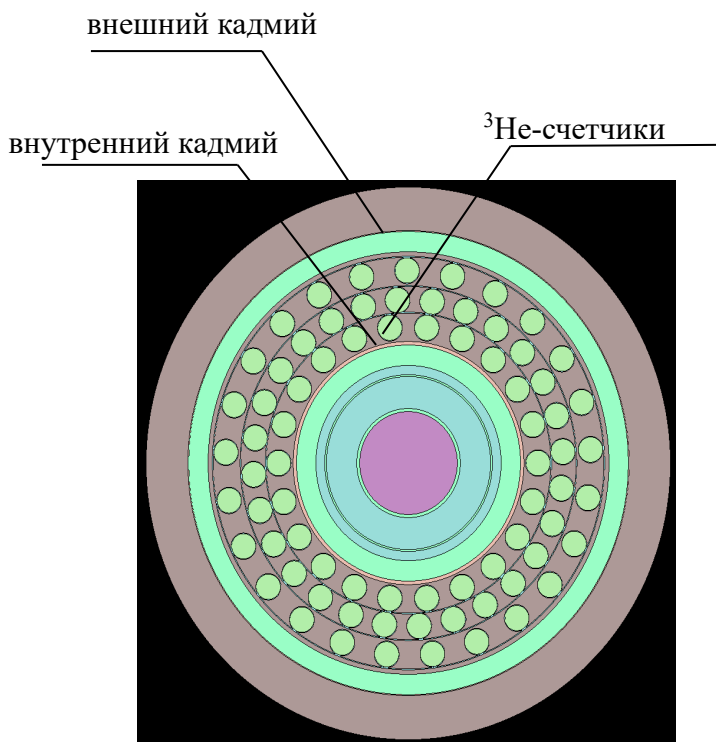


Рисунок 5 – модель счетчика РСМ-01 в программном комплексе Serpent (вид сверху)

Основные результаты работы:

1. В программной среде Serpent построены математические модели счетчиков нейтронных совпадений AWCC и RENMC. Результаты верификации модели счетчика AWCC в программах Serpent и MCNPX на измерениях со стандартными плутониевыми образцами, источниками ^{252}Cf , ^{238}Pu -Be обосновывают возможность использования Serpent при разработке методик измерения. Проведена успешная верификация модели счетчика RENMC на измерениях со стандартными образцами металлического плутония, диоксида плутония, контейнеров с диоксидом плутония ПО «Маяк», образцах смешанного МОКС- и ЧУП-топлива, скрапах.

2. Впервые разработан расчетно-экспериментальный метод определения эффективной массы ^{240}Pu в образцах, содержащих плутоний различной физико-химической формы с передачей размера образца от аттестованного объекта к исследуемому. Данный метод обеспечил уменьшение числа стандартных образцов, возможность анализа образцов различной формы, уменьшение смещения результатов измерения.

3. Результаты работы внедрены в аттестованную методику АО «ВНИИНМ» МВИ №7/393-2020 «Плутоний. Измерение эффективной массы изотопа ^{240}Pu методом множественности нейтронов», Свидетельство №5099/01.00044-2025, и применяются для оценки эффективной массы ^{240}Pu в образцах металлического плутония, смешанного нитридного и оксидного топлива, РАО. На основании выполненных исследований уточнены приписанные методике характеристики погрешности измерений.

4. На основе проведенных расчетных работ разработана конструкция российского счетчика множественности нейтронов РСМ-01 для измерений контейнеров с диоксидом плутония ПО «Маяк». Конструкция счетчика РСМ-01 является надтепловой системой, в качестве прототипа для которой был взят счетчик RENMC. Преимущества данной конструкции по сравнению с традиционной тепловой системой заключаются в меньшем

времени жизни нейтрона в установке, что позволяет снизить число случайных совпадений, и в меньшей чувствительности эффективности регистрации к энергетическому спектру.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в научных рецензируемых журналах:

1. Владимиров Д.А., Рогожкин В.Ю., Алеева Т.Б., Горбунова А.Ю., Пугачев П.А. Численное моделирование измерений характеристик образцов плутония на счетчике нейтронных совпадений АWCC // Атомная энергия. – 2024. – Т. 136, вып. 3–4. – С. 124–130. (ВАК, K1; Scopus Q2).
2. Владимиров Д. А., Рогожкин В. Ю. Измерение массы плутония в РАО методом множественности нейтронов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2024. – Вып. 3(124). – С. 105–113. (ВАК, K2).
3. Владимиров Д. А., Рогожкин В. Ю., Власкин Г. Н., Алеева Т. Б. Расчет калибровочных коэффициентов метода множественности нейтронов измерения эффективной массы плутония-240 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2024. – Вып. 4. – С. 16–28. (ВАК, K2).
4. Владимиров Д. А., Прошкина О. С., Рогожкин В. Ю., Сычева Н. В. Оценка влияния физико-химических свойств образца на измерения эффективной массы плутония-240 методом множественности нейтронов с использованием счетчика RENMC // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2025. – Вып. 1(127). – С. 163–174. (ВАК, K2).