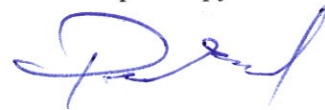


На правах рукописи



Федоров Сергей Григорьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ,
РАСШИРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ
ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ И ПЕРЕДАЧЕ ЕДИНИЦ МОЩНОСТИ
ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ, МОЩНОСТЕЙ АМБИЕНТНОГО И
ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЭКВИВАЛЕНТОВ ДОЗЫ
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Менделеево – 2026 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Научный руководитель:

Берлянд Александр Владимирович – кандидат технических наук, начальник лаборатории дозиметрии ионизирующих излучений ФГУП «ВНИИФТРИ».

Официальные оппоненты:

Васильев Игорь Олегович – доктор технических наук, советник Департамента развития научно-производственной базы ядерного оружейного комплекса Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», г. Москва.

Соловьев Алексей Николаевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией медицинской радиационной физики МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России (ФГБУ «НМИЦ Радиологии» Минздрава России), г. Обнинск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), г. Санкт-Петербург.

Защита диссертационной работы состоится «___» _____ 2026 г. в ___:___ часов на заседании диссертационного совета Д 32.1.004.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, Московская обл., г. Солнечногорск, пгт. Менделеево, (промзона ВНИИФТРИ).

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» (www.vniiftri.ru): <https://www.vniiftri.ru/assets/uploads/dis/fedorov/dissertaciya-fedorov-s-podpisyu.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Балаханов

Актуальность темы исследования

Радиационная безопасность является важным элементом национальной безопасности и гарантирует защищенность настоящего и будущих поколений от вредного влияния радиации. Речь идет, в первую очередь, об использовании атомной энергии, различных ядерно-физических установок и источников ионизирующего излучения в промышленности, науке, медицине, сельском хозяйстве, космической технике и т.д. Любое полезное применение радиации должно быть безопасным.

Основные требования, которые регламентируют работу с источниками ионизирующего излучения, включены в «Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения» (далее – МОНБ) [1]. МОНБ, как и другие документы Международного агентства по атомной энергии (далее – МАГАТЭ) и Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (далее – МКРЕ) имеют рекомендательный характер и служат в качестве практического руководства для государственных органов и служб, работодателей и работников по вопросам радиационной защиты, безопасности и охраны здоровья.

В Российской Федерации на основе международного опыта разработаны законы в области радиационной безопасности [2-4]. Требования Федеральных законов детализируют «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» и «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010» (далее – Нормы и Правила) [5-6]. Соблюдение Норм и Правил тесно связано с обеспечением единства измерений. В области дозиметрии нейтронного излучения для обеспечения единства измерений применяется Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов нейтронного излучения ГЭТ 117-2023 (далее – ГЭТ 117-2023).

Проблемами в области дозиметрии и спектрометрии нейтронного излучения занимались учёные ВНИИФТРИ – Брегадзе Ю.И., Ярына В.П., Масляев П.Ф., Севастьянов В.Д. и др. Ими были разработаны методы восстановления нейтронных спектров, способы аппроксимации нейтронных спектров, методы оценки погрешности определения спектров, а также детекторы нейтронов и методы их применения для измерения спектров [7].

В институте физики высоких энергий – специалисты Ю.Г. Абов, Г.Н. Караваев, Санников А. В., Е.Н. Савицкая и др. – разработали один из первых российских образцов многошарового спектрометра нейтронов и развили методы нейтронной спектрометрии на больших протонных ускорителях.

Коллектив ученых СНИИП занимался разработкой однокристалльного нейтронного спектрометра и исследованиями сцинтилляционных детекторов в области дозиметрии нейтронного излучения.

Ученые ВНИИЭФ – Маслов Г.Н., Замятин Ю.С., Васильев Ю.А., Виноградов Ю.И. и др. – занимались исследованиями спектров нейтронов деления, проводили исследования спонтанного деления на ядрах урана, а также разрабатывали и использовали в нейтронных измерениях нейтронный спектрометр с пропорциональным газовым счётчиком протонов отдач.

Специалисты физико-энергетического института – Сальников О.А., Трыков Л.А., Ковальчук В.Д. – являются основоположниками спектрометрии на основе времяпролетного метода. Климентов В. Б. и Рязанов Д.К. проводили исследования и разработку спектрометров нейтронов на основе набора активационных детекторов. Мокров Ю. В. занимался разработкой методов и средств метрологического обеспечения радиационного контроля нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах.

Исследованиями в области нейтронной физики занимались ученые ВНИИМ им. Д.И. Менделеева – Андреев О.Л., Ярицына И.А., Рамендик З.А., Щеболев В.Т., Моисеев Н.Н. и др. – это исследования и разработка эталонной базы в области потока и плотности потока нейтронов, исследования активационных детекторов для определения потока нейтронов в полях нейтронных генераторов.

За рубежом проблемами нейтронной дозиметрии и спектрометрии занимаются коллективы метрологических институтов и исследовательских лабораторий национального института квантовой и радиологической науки и технологий (Япония), национального ядерной лабораторий (Великобритания), а также ученые из Германии (A. Zimbal, L. Giacomelli, R. Nolte, H. Schuhmacher), США (William D. Ratcliffe, Jeffrey W. Lynn, Nicholas Butch, Craig Brown), Кореи (Sinchul Kang, Jungho Kim, JoongHyun Kim, Hyeoungwoo Park) и др.

В связи с расширением областей применения нейтронного излучения и разработкой новых ядерно-физических установок (далее – ЯФУ) в области атомной промышленности и энергетики, строительством и введением в эксплуатацию центров нейтронной лучевой терапии в области здравоохранения, а также вступлением в силу Постановления Правительства Российской Федерации (далее – ПП РФ) от 16.11.2020 г. № 1847 и ПП РФ от 16.03.2020 г. № 287 и требований международных документов МАГАТЭ [8] и МКРЕ [9] необходимо было:

- обеспечить прослеживаемость результатов измерений, полученных на высокоточных средствах измерений единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения (клинических дозиметров), к ГЭТ 117-2023, с относительной расширенной неопределенностью измерений ($k=2$), которая не должна превышать 3 %;
- в соответствии с требованиями медицинских регламентов вдвое расширить верхнее значение границы измерения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения с $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ Гр·с⁻¹;
- разработать методы и средства передачи единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения средствам измерений, применяемых на ядерно-физических установках в нейтронной лучевой терапии;
- вдвое расширить верхнюю границу диапазона энергий, в котором воспроизводятся и передаются единицы мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения с 10 до 20 МэВ для обеспечения радиационного и индивидуального дозиметрического контроля при работе на высокоэнергетических установках, что соответствует требованиям стратегий развития: «Report of the workshop to discuss the CCRI Strategic Plan 2020-2025 and the CIPM MRA Review» и «Strategy 2030 +»;
- разработать методы и средства воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения в диапазоне энергий нейтронов от $1 \cdot 10^{-3}$ до 20 МэВ на основе методов спектрометрии нейтронов, позволяющие учитывать влияющие факторы рассеянного излучения в полях, применяемых на практике.

Целью диссертационной работы является обеспечение единства и требуемой точности измерений единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения путем улучшения метрологических характеристик Государственного первичного эталона единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалента дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2010.

Для достижения поставленной в данной диссертационной работе цели были решены следующие **задачи**:

Основная научная задача исследования: обоснование, разработка и исследование методов и средств воспроизведения и передачи единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения для обеспечения единства измерений в области дозиметрии нейтронного излучения.

Частные задачи исследования:

1. Выполнить анализ методов и средств воспроизведения и передачи единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения.

2. Разработать аппаратурно-методический комплекс для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на основе ионизационного метода регистрации нейтронов.

3. Разработать и исследовать методы и средства передачи единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения средствам измерения, применяемым на ядерно-физических установках в нейтронной лучевой терапии.

4. Разработать аппаратурно-методический комплекс для воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения на основе метода восстановления энергетического спектра нейтронов.

5. Исследовать метрологические характеристики разработанных аппаратурно-методических комплексов.

Объектом исследований является дозиметрия и спектрометрия нейтронного излучения.

Предметом исследований являются методы и средства воспроизведения и передачи единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения.

Научная новизна исследований:

1. Впервые учтена поправка на эффект температурного расширения конструктивных элементов ионизационной камеры, позволяющая учесть изменение массы газа в эффективном объеме при воспроизведении единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения.

2. Впервые для целей нейтронной лучевой терапии разработаны метод и средства измерений единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на основе созданного многоканального сцинтилляционного блока регистрации с автоматизированной системой управления, измерения, сбора и обработки данных, позволяющие обеспечить передачу единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения с относительной расширенной неопределенностью измерений U , не превышающей 2,9 % при $k = 2$.

3. Впервые разработан аппаратурно-методический комплекс для воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения, позволяющий осуществлять расчет данных единиц величин на основе измерений энергетического спектра нейтронов в диапазоне энергий от $1 \cdot 10^{-3}$ до 20 МэВ за счет расширенного набора детекторов и увеличения числа энергетических групп с 47 до 227, что позволило осуществлять передачу данных единиц величин в смешенные гамма-нейтронные поля, применяемые на практике.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный аппаратурно-методический комплекс на основе новой конструкции ионизационных камер позволяет расширить верхнее значение границы диапазона воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения с $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ Гр·с⁻¹, а также уменьшить относительную расширенную неопределенность измерений U при $k = 2$ во всем диапазоне с 4,4 % до 2,7 %.

2. Разработанный метод и средства измерений на основе многоканального блока регистрации позволяют осуществить передачу единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на ядерно-физические установки в нейтронной лучевой терапии, с относительной расширенной неопределенностью измерений U , не превышающей 2,9 % при $k = 2$.

3. Разработанный аппаратурно-методический комплекс воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения, позволяющий осуществлять расчет данных единиц величин на основе измерений энергетического спектра нейтронов в диапазоне энергий от $1 \cdot 10^{-3}$ до 20 МэВ за счет расширенного набора детекторов и увеличения числа энергетических групп с 47 до 227

с относительной расширенной неопределенностью измерений U , не превышающей 6,8 % при $k = 2$.

Практическая значимость:

1. Результаты работы внедрены в состав Государственного первичного эталона единиц поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2023 при проведении его совершенствования.

2. Полученные в работе результаты позволили обеспечить единство измерений в области клинической дозиметрии нейтронного излучения, а также проводить испытания, поверку и калибровку новых высокоточных средств измерений.

3. Разработанные методы и средства воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения позволили осуществлять измерения энергетического спектра нейтронов в гамма-нейтронных полях, применяемых на практике.

Личный вклад автора.

Все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в настоящей работе, получены автором лично, либо при решающем его участии.

Автором выполнены работы в части проектирования, разработки и исследования аппаратно-методического комплекса с набором ионизационных камер, его сборке и отладке. Результаты работ позволили обеспечить воспроизведение единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения в диапазоне значений от $2 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ Гр·с⁻¹, а также уменьшить относительную расширенную неопределенность измерений U при $k = 2$ во всем диапазоне воспроизведения с 4,4 % до 2,7 %.

Автором разработаны метод и средства измерений единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на основе многоканального сцинтилляционного блока регистрации с автоматизированной системой управления, измерения, сбора и обработки данных, позволяющие осуществить передачу единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на ядерно-физические установки в нейтронной лучевой терапии, с относительной расширенной неопределенностью измерений U , не превышающей 2,9 % при $k = 2$.

Автором выполнено проектирование, разработка, моделирование, сборка, отладка и исследование аппаратно-методического комплекса для воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения на основе измерений энергетического спектра нейтронов. Результаты работ позволили обеспечить воспроизведение и передачу данных единиц величин в диапазоне энергий от $1 \cdot 10^{-3}$ до 20 МэВ с относительной расширенной неопределенностью измерений U , не превышающей 6,8 % при $k = 2$, за счет включения в состав ГЭТ 117-2023 расширенного набора детекторов и расширения набора энергетических групп.

Степень достоверности результатов диссертационной работы.

Достоверность научных результатов, полученных в работе, подтверждается применением апробированных методов определения параметров ионизирующих излучений (в том числе ионизационного и сцинтилляционного методов), а также современных методов статистической обработки экспериментальных данных с оценкой расширенной неопределенности измерений.

Для экспериментальных работ при определении метрологических характеристик созданных первичных преобразователей использовались поверенные и калиброванные высокоточные средства измерений и аттестованное программное обеспечение.

Достоверность разработанных методов измерений и аппаратурных решений подтверждена их успешными государственными испытаниями и утверждением разработанного комплекса в качестве Государственного первичного эталона единиц поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2023.

Внедрение результатов

1. Проведено совершенствование Государственного первичного эталона единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалента дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2010 (Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 марта 2023 г. № 602);

2. Разработана и утверждена Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения (Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июля 2023 г. № 1490);

Результаты исследований реализованы при проведении работ по аттестации эталонов дозиметрических единиц величин нейтронного излучения и подтверждены актами внедрения от организаций: ООО «НПП «Доза», ФБУ «Мурманский ЦСМ», ФБУ «Самарский ЦСМ», ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест», ООО «ПримТехнополис», ФБУ «Новосибирский ЦСМ», АО «ННПО имени М.В. Фрунзе».

Апробация результатов диссертационной работы.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 21 статье, в том числе в 8 статьях в изданиях из Перечня ВАК российских рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертационной работы, и в 40 докладах на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, патент РФ № 2853692 от 25 декабря 2025 г. на изобретение «Блок регистрации нейтронного и гамма-излучений, основанный на сцинтилляционном методе регистрации».

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, из 120 наименований, 8 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 168 страницы. Диссертационная работа содержит 58 рисунков и 20 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указана цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, определена практическая значимость проведенных исследований и личный вклад автора.

В **Главе 1** проведен литературный обзор по теме диссертационного исследования. Представлен анализ литературных данных, отражающих современное состояние проблем и решаемых задач обеспечения единства измерений в области дозиметрии нейтронного излучения. В разделах 1.1 и 1.2 проведен анализ реализованных методов определения единиц мощности поглощенной дозы (далее – МПД), мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы (далее – МАЭД и МИЭД) нейтронного излучения в зарубежных метрологических лабораториях. Описаны преимущества и недостатки данных методов. В разделе 1.2.4 рассматриваются реализованные методы определения дозиметрических единиц величин, реализованных на базе ГЭТ 117-2010. Проведен анализ составляющих бюджета неопределенности при воспроизведении единиц МПД, МАЭД и МИЭД нейтронного излучения. В разделе 1.3 сделаны выводы о необходимости улучшения метрологических характеристик Государственного первичного эталона единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалента дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2010 (далее – ГЭТ 117-2010). Сформулированы частные задачи исследования.

В **Главе 2** описан принцип воспроизведения единицы МПД нейтронного излучения, основанный на ионизационном методе с комплектом полостных ионизационных камер. Учитывая конструктивные особенности и физику взаимодействия нейтронов с веществом, а также учитывая модификации теории полости в приближении Брэгга-Грея [10], уравнение воспроизведения, связывающее силу тока с МПД нейтронного излучения в веществе $\dot{D}_n^B$, представлено в виде формулы:

$$\dot{D}_n^B = \frac{1}{m_{\text{газ}}} \cdot \frac{dE}{dt} = \frac{I \cdot \bar{W}}{m_{\text{газ}} \cdot e} \cdot \frac{\left(\frac{\bar{S}}{\rho}\right)_{\text{ст}}}{\left(\frac{\bar{S}}{\rho}\right)_{\text{газ}}} \cdot \frac{\left(\frac{\bar{\sigma}}{\rho}\right)_{\text{в}}}{\left(\frac{\bar{\sigma}}{\rho}\right)_{\text{ст}}} \cdot \prod k_i, \quad (1)$$

где $\dot{D}_n^B$ – мощность поглощенной дозы нейтронного излучения в веществе; E – поглощенная энергия; I – сила тока в полостной ионизационной камере; $\bar{W}$ – средняя энергия образования пар ионов в газовой среде; e – заряд электрона $\frac{(s/\rho)_{\text{ст}}}{(s/\rho)_{\text{газ}}}$ – отношение массовых тормозных способностей материала стенки камеры и газа, соответственно, усредненных по соответствующему спектру вторичных заряженных частиц; $\frac{(\bar{\sigma}/\rho)_{\text{в}}}{(\bar{\sigma}/\rho)_{\text{ст}}}$ – отношение микроскопических сечений взаимодействия нейтронов в веществе и материале стенки камеры, приведенных к единичной плотности материалов, соответственно; $m_{\text{газ}}$ – масса газа в эффективном объеме ионизационной камеры; t – время измерения; k_i – поправочные коэффициенты.

Проведен анализ составляющих бюджета неопределенности измерений при воспроизведении единицы МПД нейтронного излучения ГЭТ 117-2010, входящих в уравнение (1). В это уравнение в основном входят стандартные справочные данные и константы, сила тока измеряется с помощью электрометра на уровне 10^{-2} пА. В связи с вышесказанным, точность воспроизведения единицы МПД зависит от определения массы газа в эффективном объеме ионизационной камеры.

Масса газа в эффективном объеме полостной ионизационной камеры определяется

из уравнения Менделеева-Клайперона по формуле:

$$m_{\text{газ}} = \frac{PV_{\text{эфф}}M_{\text{газ}}}{RT}, \quad (2)$$

где P – давление газа в ионизационной камере, $V_{\text{эфф}}$ – эффективный объем полостной ионизационной камеры, определяется на стадии изготовления, $M_{\text{газ}}$ – молярная масса газа, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Точность такого метода определения массы газа во многом зависит от чистоты заполняющего газа, а также от точности определения давления и температуры во время перезаполнения камеры и в ходе процесса измерений.

В составе ГЭТ 117-2010 применялся весовой метод измерения давления газа в ионизационной камере. Метод основан на уравнивании сил атмосферного давления весом столба жидкости $\Delta P=0,2$ кПа с последующим измерением значений давления барометром-анероидом. Принцип действия, которого заключается в деформации мембранной анероидной коробки при измерении атмосферного давления и преобразовании рычажным механизмом ее линейного перемещения в угловое перемещение указательной стрелки. Принципиальная схема системы наполнения камер газами на основе весового метода представлена на рисунке 1.

Недостатками данного метода являются:

- использование столба жидкости для обеспечения гидрозатвора, где в качестве жидкости используются вода, этанол, толуол, силиконовое масло, которые подвержены испарению и требуют постоянного контроля уровня жидкости, что приводит к дополнительным трудностям при определении поправки;
- использование жидкостного манометра (барометра) с ртутью в качестве манометрической жидкости. Манометрам данной конструкции требуется тщательная подготовка перед измерениями, а точность их показаний зависит от стабильности температуры в помещении, где проводятся измерения, от наклона поверхности и т.д. Описанные недостатки приводят к дополнительной погрешности на уровне 0,5 % несмотря на то, что погрешность самого манометра не превышает 0,2 %.

Суммарная погрешность данного метода с учетом описанных выше недостатков может быть представлена следующим образом:

$$\delta P_{\text{г}} = \sqrt{\delta_{\text{атм}}^2 + \delta_{\Delta P}^2 + \delta_{\text{доп}}^2} \quad (3)$$

где $\delta_{\text{атм}}$ – погрешность используемого барометра-анероида, не превышает 0,2 %, $\delta_{\Delta P}$ – погрешность, связанная с определением давления столба жидкости гидрозатвора, не превышает 0,8 %, $\delta_{\text{доп}}$ – погрешность учета дополнительных поправок при измерении давления, не превышает 0,5 %.

Для уменьшения неопределенности измерений, связанной с измерением давления, проанализированы основные методы измерения давления газа (весовой, частотный, пьезорезисторный, термокондуктивный и др.). Анализ литературных данных [11] показывает, что наилучшим методом для измерения давления является силовой с использованием прямого преобразователя, в котором сила конвертируется в электрическую величину с помощью преобразователя на основе пьезоэлектрика. Принципиальная схема разработанной системы наполнения камер газами на основе силового метода представлена на рисунке 2.

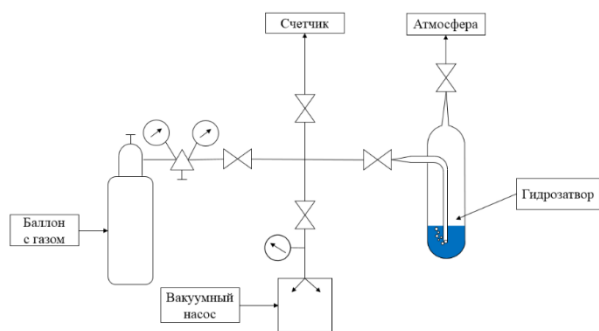


Рисунок 1 – Принципиальная схема наполнения камер газами на основе весового метода

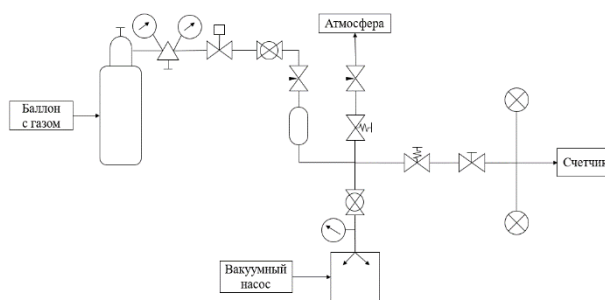


Рисунок 2 – Принципиальная схема наполнения камер газами на основе силового метода

Разработанный стенд прецизионного наполнения ионизационных камер газами содержит в себе редукторы, шаровые моторизированные краны для автоматического открытия (закрытия) системы при откачке, игольчатые краны для плавного впуска (выпуска) газа в систему, позволяет осуществлять точную подстройку за счет конусообразной формы штока, шаровой кран, соленоидные электромагнитные клапаны для автоматического открытия (закрытия) системы при откачке, форвакуумный насос, необходимый для откачки газа из камеры перед его непосредственным заполнением, буферный газовый баллон необходим для термостатирования впускаемого газа в систему, программируемые прецизионные датчики давления, систему автоматического управления (на схеме не изображена).

В качестве чувствительного элемента в преобразователях применяется кварцевый микрочип с измерительной мембраной, на которую нанесены полупроводниковые пьезорезисторы, соединенные по мостовой схеме. Верхний предел измерений давления составляет 2 и 3 бар, соответственно. Предел допустимой основной приведенной погрешности составляет 0,05 %.

При воспроизведении единицы МПД нейтронного излучения с помощью ионизационного метода существенным является требование, чтобы заряд, снимаемый с эффективного объема камеры, был пропорционален энергии, выделяемой в камере. Одной из причин, которая приводит к наибольшему нарушению пропорциональности, является наличие примеси электроотрицательного газа в эффективном объеме [12]. Технический этилен, используемый для наполнения камер из состава ГЭТ 117-2010, содержит около 0,5 % примесей, в котором заметную часть заставляют элементы: O_2 , N_2 , CH_4 , H_2O . Наличие большого количества примесей ухудшает экспериментальный сигнал и требует введения дополнительных поправок при его обработке для учета эффекта прилипания электронов к молекулам электроотрицательного газа и образования отрицательных ионов.

В работе [12] для плоской ионизационной камеры при нормальном давлении с расстоянием между электродами в несколько сантиметров уменьшение амплитуды импульса на 1 % получается, если примесь составляет порядка $1 \cdot 10^{-4}$ %. Для цилиндрического пропорционального счетчика этот эффект имеет более существенное проявление.

Поскольку внутренний корпус, ограничивающий эффективный объем камер, изготовлен из полимерных материалов, его не удастся достаточно хорошо обесгазить, поэтому газ в камерах со временем загрязняется. Кроме этого, газ адсорбируется стенками камеры, что приводит к изменению давления. Из сказанного следует, что к газу, используемому для наполнения камер, предъявляются довольно жесткие требования к чистоте электроотрицательных газов, поэтому для качественной работы камер часто необходимо проводить очистку рабочего газа от паров воды и кислорода, что является достаточно трудоемким процессом, сложно реализуемым на практике. Для решения этой задачи был использован высокочистый газ с содержанием этилена 99,99 % и минимальным количеством примесей электроотрицательных газов. Использование

высокочистого этилена позволило уменьшить погрешность, связанную с определением молярной массы газа δ_μ , входящей в состав уравнения (2), с 0,50 % до 0,02 %.

Дополнительным параметром, который вносит существенный вклад в изменение массы газа в эффективном объеме, является коэффициент температурного расширения материалов внешнего и внутреннего корпусов. В ходе проведенных исследований было получены следующие результаты - совокупный эффект при изменении температуры в пределах 10 градусов приводит к измерению массы газа в эффективном объеме от 0,07 % до 0,74 % в зависимости от размеров и материалов камер, ограничивающего эффективный объем камеры. Для учета данного эффекта в конструкцию ионизационной камеры был встроен датчик давления и температуры. А для минимизации поправочного коэффициента учитываются усредненные показания давления и температуры с датчика до и после проведения измерений единицы МПД нейтронного излучения с последующей нормировкой на показания датчика при наполнении ионизационной камеры.

Таким образом, совокупность работ по замене стенда прецизионного наполнения камер газами, внесения изменений в конструкцию ионизационных камер и использование высокочистых газов способствует снижению погрешности измерения при определении массы газа с 2,0 % до 0,5 %. Разработанная система наполнения камер газами позволила существенно улучшить метрологические характеристики измерительного комплекса по воспроизведению единицы МПД нейтронного излучения, а автоматизация процесса заполнения камеры газом позволила уменьшить неопределенность измерений, связанную с несовершенством ранее используемой измерительной технологии. Обобщенный бюджет неопределенности измерений метода и средства воспроизведения единицы МПД нейтронного излучения представлен далее в таблице 1.

Для решения задачи по расширению верхней границы диапазона воспроизведения и передачи единицы МПД нейтронного излучения до $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гр} \cdot \text{с}^{-1}$, выполнено масштабирование конструкции ионизационных камер с учетом доработки конструкции для установки датчика давления и температуры. Физические аспекты взаимодействия нейтрона с веществом, заложенные и учитываемые в конструкции при разработке ионизационных камер еще в 90-х годах прошлого столетия, претерпели существенные изменения. В 2018 году вышла восьмая версия библиотеки о ядерных реакциях и константах [13], в которой расширены энергетические интервалы для взаимодействия нейтронов, добавлены более детальные описания распределений вторичных заряженных частиц как для многокомпонентных материалов, так и для отдельных элементов.

На основании вышеописанного, перед изготовлением нового набора ионизационных камер проведен анализ и оценка выполнения условий модификации теории полости в приближении Брэгга-Грея, положенных в основу воспроизведения единицы МПД нейтронного излучения, а именно:

- состояния электронного равновесия вторичных заряженных частиц, образующихся в результате взаимодействия косвенного ионизирующего излучения (нейтронного или гамма-излучения) с веществом;
- толщина стенки, ограничивающей эффективный объем, должна быть больше или равна пробегу вторичных заряженных частиц;
- размер газовой полости должен быть много меньше пробега вторичных заряженных частиц в этом веществе;
- газовая полость и стенка, окружающая эту полость, должны быть однородными, т.е. выполнены из одного материала или должны быть сравнимы по атомной массе вещества;
- должно обеспечиваться электронное равновесие спектра вторичных заряженных частиц на входе и выходе из чувствительного объема газовой полости;
- возмущение поля нейтронов от полостной ионизационной камеры должно быть пренебрежимо мало.

При проведении анализа было учтено, что в полях нейтронного излучения всегда присутствует доля гамма-излучения, поэтому для покомпонентного измерения единицы МПД

от нейтронного и гамма-излучений используется набор ионизационных камер. В работах [14-15] описано, что наименьшая погрешность измерения единицы МПД нейтронного излучения обеспечивается в случае использования набора ионизационных камер с максимально различающейся чувствительностью к нейтронному излучению и одинаковой чувствительностью к гамма-излучению. Таким образом, в набор включены ионизационные камеры из полиэтилена, графита и алюминия, так как данные материалы позволяют обеспечить наибольшую чувствительность к вышеуказанным типам излучений.

Толщина стенки x , ограничивающей эффективный объем, должна быть больше или равна максимальной длине свободного пробега вторичных заряженных частиц λ . Максимальная длина свободного пробега рассчитывается в зависимости от максимальной энергии вторичных заряженных частиц, которую нейтрон может передать веществу за единичное взаимодействие. При упругом рассеянии нейтрона с начальной энергией E_0 на ядре с массовым числом A максимальная потеря энергии E_{max} определяется по формуле:

$$E_{max} = E_0 \cdot \frac{4A}{(A+1)^2} \quad (4)$$

На основе данных, рассчитанных по формуле (4), получается, что толщина стенки, ограничивающей эффективный объем ионизационной камеры, должна быть:

- от 1,9 до 4,2 мм для закрытых радионуклидных источников нейтронов;
- от 4,7 до 12,9 мм для генерирующих источников нейтронного излучения.

В результате, для ионизационных камер из состава ГЭТ 117-2010, в конструкции которых толщина стенки 3 мм, условие электронного равновесия выполняются корректно, но применение данных камер должно быть ограничено только полями закрытых радионуклидных источников. Стоит отметить, что применение камер, с толщиной стенки 3 мм, в полях с использованием генерирующих источников нейтронного излучения приводит к существенной ошибке при измерении единицы МПД нейтронного излучения из-за нарушения условий электронного равновесия. Поэтому для полей на основе генерирующих источников нейтронного излучения был изготовлен набор ионизационных камер с толщинами стенок в диапазоне от 4,7 до 12,9 мм, которые подбираются исходя из средних энергий полей нейтронов, применяемых на практике.

Результаты исследования метрологических характеристик в виде бюджета неопределенности измерений разработанного аппаратурно-методического комплекса воспроизведения единицы МПД нейтронного излучения с комплектом ионизационных камер представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Бюджет неопределенности измерений при воспроизведении единицы МПД нейтронного излучения

Источник погрешности, неопределенности	ГЭТ 117-2023	
	$u_A, \%$	$u_B, \%$
Определение массы газа (m_g)		0,26
Измерение силы тока (I)	0,50	0,16
Средняя энергия образования пар ионов ($\bar{W}$)		0,58
Отношение массовых тормозных способностей $((S/\rho)_{ст}/(S/\rho)_г)$		0,58
Отношение микроскопических сечений взаимодействия нейтронов в веществе и материале стенки камеры на плотность $((\sigma/\rho)_в/(\sigma/\rho)_{ст})$		0,58
Искажение потока нейтронов в стенке камеры ($k_{ст}$)		0,29
Искажение потока нейтронов стенкой внешнего корпуса ($k_{кор}$)		0,29
Поправка на гомогенность материала стенки камеры и газа ($k_{гом}$)		0,29
Погрешность, обусловленная вкладом дозы от гамма-излучения (k_γ)		0,44
Относительная суммарная стандартная неопределенность измерений $u_c, \%$	1,35	
Относительная расширенная неопределенность измерений U при $k = 2, \%$	2,70	

Таким образом, разработанный аппаратно-методический комплекс воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на основе новой конструкции ионизационных камер с автоматизированной системой управления, измерения, сбора и обработки данных, позволяет расширить верхнее значение диапазона воспроизведения единицы МПД нейтронного излучения с $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ Гр·с⁻¹, а также уменьшить относительную расширенную неопределенность измерений U при $k = 2$ во всем диапазоне воспроизведения с 4,4 % до 2,7 %, что позволяет обеспечить единство измерений в области клинической дозиметрии нейтронного излучения.

Глава 3 посвящена результатам разработки метода и средств передачи единицы МПД нейтронного излучения в поля гамма-нейтронного излучения для применения в нейтронной лучевой терапии.

Проведен анализ существующих ЯФУ, применяемых в нейтронной лучевой терапии, представленных в работах [16-17]. Анализ их метрологических и технических характеристик, а также медицинских правил и рекомендаций по проведению облучения пациентов [8, 18] накладывает ряд ограничений:

- конструкционные: размеры ионизационных камер от 56 до 112 мм, размеры коллимированного поля на ЯФУ от 40 до 200 мм, ресурс и стабильность работы мишеней и трубок ЯФУ;
- физические: необходимость проведения серии измерений для выявления доли гамма-излучения, неоднородность поля излучения на малых расстояниях, увеличение вклада гамма-излучения за счет активации мишенного блока.

Для осуществления передачи единицы МПД нейтронного излучения на ЯФУ в зависимости от глубины залегания опухоли численными методами проведен компонентный анализ полей, применяемых в медицине. В результате анализа выявлены три составляющие, которые вносят наибольший вклад в поглощенную дозу (рисунок 3): вклад от быстрых нейтронов в прямом пучке, вклад от гамма-излучения, образующегося от мишени и коллиматора, вклад от рассеянных нейтронов, образующихся в теле пациента.

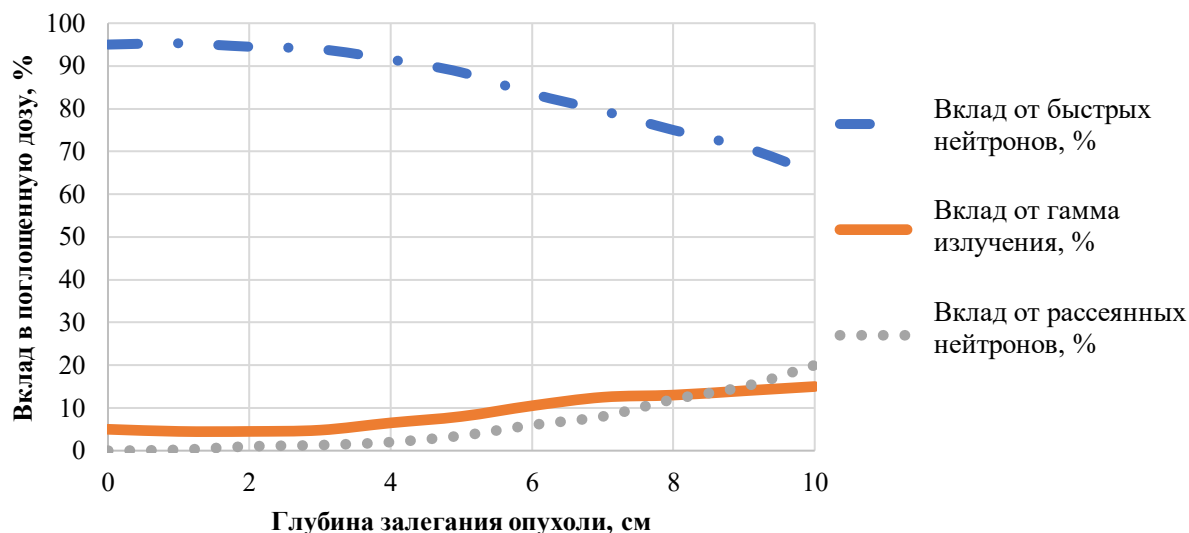


Рисунок 3 – Зависимость вклада доли рассеянного излучения в поглощенную дозу от глубины залегания опухоли

Разработан аппаратно-методический комплекс, основанный на применении сцинтилляционного метода регистрации ионизирующего излучения. Измерительная система комплекса, представленная на рисунках 4 и 5, включает в себя блок регистрации, блок обработки сигнала, персональный компьютер для управления, сохранения и дальнейшей обработки измеренных результатов. Блок обработки сигнала состоит из блока питания с тремя независимыми каналами, блока усиления, позволяющего осуществлять подстройку измеренного

сигнала, аналогово-цифрового преобразователя, предназначенного для сбора, обработки и накопления информации, необходимой для набора аппаратного спектра.

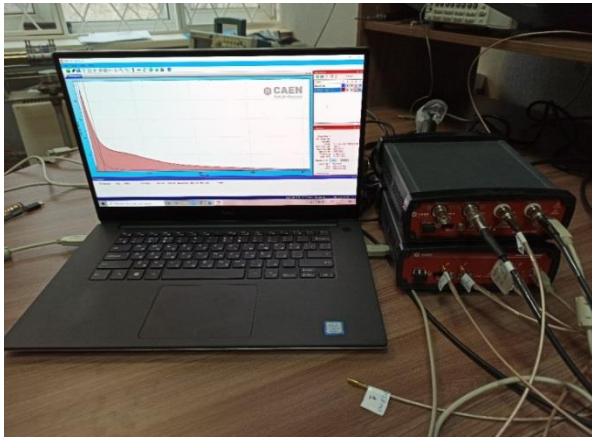


Рисунок 4 – Система управления блока регистрации с блоком обработки сигнала



Рисунок 5 – Блок регистрации со сменными колпачками с комплексом измерительной аппаратуры

Единица МПД на каждый сцинтилляционный детектор из состава разработанного блока регистрации передается посредством градуировки в реперной точке. Для сцинтиллятора быстрых нейтронов – это нейтронное поле, создаваемое нейтронным генератором со средней энергией спектра 14 МэВ. Для сцинтиллятора гамма-излучения – это поле гамма-излучения, создаваемое закрытым радионуклидным источником на основе радионуклида ^{60}Co или ^{137}Cs . Для сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов – это поле нейтронного излучения, создаваемое закрытым радионуклидным источником на основе радионуклида $^{238}\text{PuBe}$ или ^{252}Cf и поле гамма-излучения, создаваемое закрытым радионуклидным источником на основе радионуклида ^{60}Co или ^{137}Cs , где значение единицы МПД тепловых нейтронов определяется разностью показаний сцинтилляционного детектора, чувствительного к гамма-нейтронному излучению, и сцинтилляционного детектора, чувствительного только к тепловым нейтронам. Разработанная схема передачи единицы МПД нейтронного излучения на ЯФУ, представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 – Схема передачи мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на ЯФУ

В таблице 2 представлены в виде бюджета неопределенности измерений результаты исследований метрологических характеристик разработанного метода и средств передачи единицы МПД нейтронного излучения средствам измерения, применяемым на ЯФУ в нейтронной лучевой терапии.

Таблица 2 – Бюджет неопределенности измерений метода и средств передачи единицы МПД нейтронного излучения

Источник погрешности, неопределенности	Значения	
	$u_A, \%$	$u_B, \%$
Неопределенность измерений при воспроизведении единицы МПД нейтронного излучения на ГЭТ 117-2023 ($u_{ГЭТ}$)		1,35
Неопределенность измерений скорости счета (N_i)	0,05	
Неопределенность измерений коэффициента градуировки (F_i)		0,15
Стабильность		0,12
Неопределенность оценки поправочного коэффициента, учитывающего искажение потока нейтронов в корпусе детектора ($k_{кор}$)		0,10
Неопределенность оценки поправочного коэффициента, учитывающего искажение потока нейтронов в корпусе блока регистрации ($k_{ст}$)		0,10
Неопределенность оценки влияния наведенной активности от коллиматора и мишени ($C_{нав}$)		0,20
Неопределенность оценки учета вклада в дозу от рассеянных нейтронов ($D_{рас}$)		0,30
Неопределенность оценки учета вклада в дозу от гамма-излучения (D_γ)		0,30
Относительная суммарная стандартная неопределенность измерений $u_c, \%$	1,45	
Относительная расширенная неопределенность измерений U при $k = 2, \%$	2,90	

Таким образом, разработанные метод и средства измерений на основе многоканального блока регистрации с автоматизированной системой управления, измерения, сбора и обработки данных с применением набора сцинтилляционных детекторов позволяют осуществить передачу единицы МПД нейтронного излучения на ЯФУ в нейтронной лучевой терапии, с относительной расширенной неопределенностью измерений U , не превышающей 2,9 % при $k = 2$.

В Главе 4 приведено описание принципа воспроизведения единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения, основанного на измерении энергетического спектра нейтронов методом сфер Боннера с использованием сцинтилляционного детектора *LiI*. Уравнение воспроизведения, связывающее энергетический спектр нейтронов с дозовыми величинами, можно представить в виде формул:

$$\dot{H}^*(10) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} h_{\phi}^*(10, E)(E) \Phi(E) dE \quad (5)$$

$$\dot{H}_p(10) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} h_{p\phi}(10, E)(E) \Phi(E) dE \quad (6)$$

где $\dot{H}^*(10)$, $\dot{H}_p(10)$ – мощность амбиентного и индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения, соответственно; $h_{\phi}^*(10, E)$, $h_{p\phi}(10, E)$ – коэффициенты перехода от дифференциальной плотности потока нейтронов к дозиметрическим величинам нейтронного излучения, соответственно [19-20]; $\Phi(E)$ – дифференциальная плотность потока нейтронов (энергетический спектр нейтронов); E_{min} , E_{max} – нижнее и верхнее значение границ диапазона энергии нейтронов.

Проведен анализ типов реакций при взаимодействии нейтрона с веществом, вклад которых становится существенным при расширении диапазона энергий, рисунок 7. По результатам анализа выявлена необходимость учета реакций с образованием протонов и ядер отдачи, потому что их вклад в значения измеряемых величин, в зависимости от поля нейтронов, составляет от 10 % до 80 %. В ходе проведенного анализа методов спектрометрии нейтронов выявлено, что наиболее подходящим методом измерения энергетический спектр нейтронов

для целей дозиметрии нейтронного излучения является совокупность методов $n - p$ рассеяния, амплитудного и сфер Боннера.

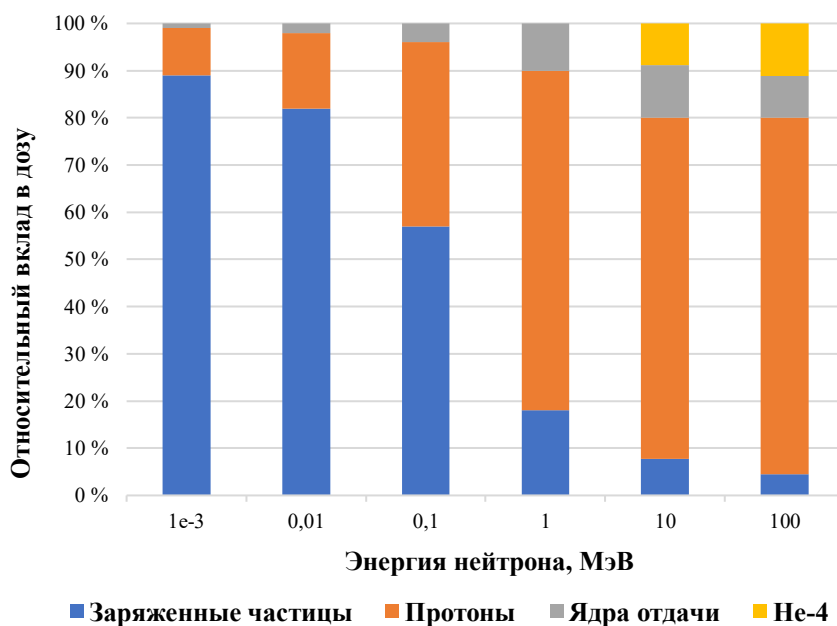


Рисунок 7 – Типы реакций при взаимодействии нейтрона с веществом

В уравнениях (5) и (6) погрешность метода воспроизведения единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения зависит от погрешности определения энергетического спектра нейтронов с учетом коэффициентов перехода. Коэффициенты перехода в данных формулах, являются справочными данными и имеют энергетическую зависимость, которая представлена на рисунке 8. Поэтому погрешность метода воспроизведения зависит от правильности и полноты измерения энергетического спектра нейтронов.

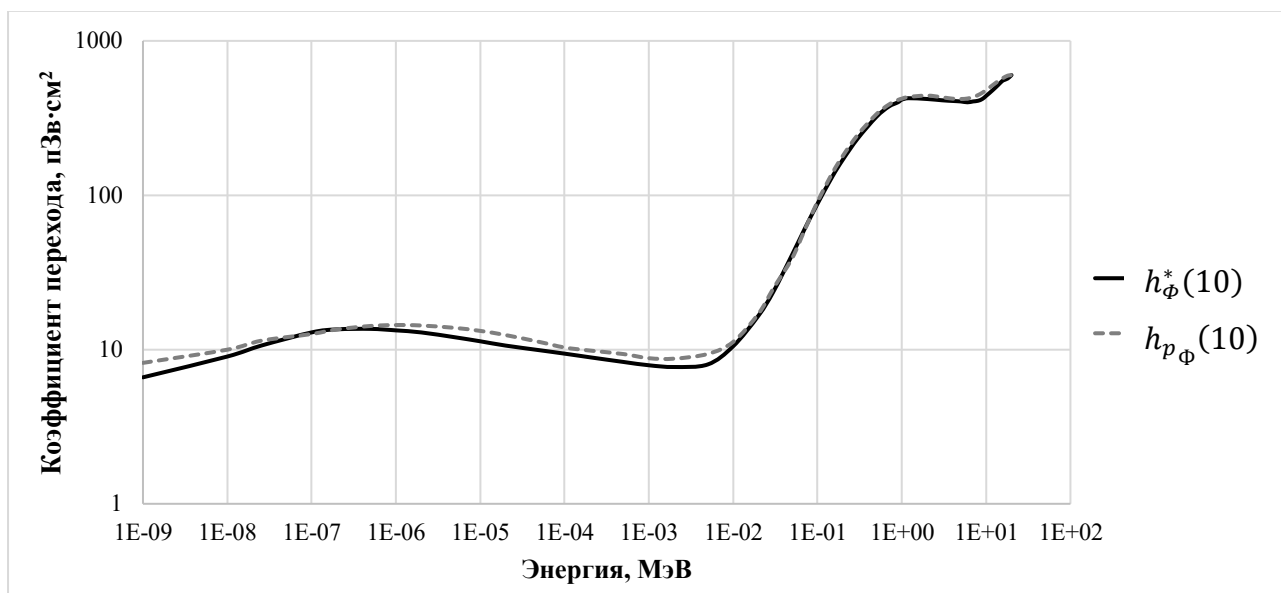


Рисунок 8 – Зависимость коэффициентов перехода от энергетического спектра нейтронов в дифференциальной форме, нормированный на полный флюенс нейтронов к единицам МАЭД и МИЭД нейтронного излучения

Для определения энергетического спектра нейтронов была разработана схема измерения, представленная на рисунке 9, где зеленым цветом выделены составные части, разработанные и усовершенствованные в рамках настоящей работы. Для учета реакций с образованием протонов

и ядер отдачи при измерении единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения, были разработаны и изготовлены блоки регистрации, основанные на сцинтилляционном и ионизационном методах. Для расширения энергетического диапазона измерений и увеличения массива экспериментальных данных были изготовлены дополнительные шаровые замедлители. Для решения уравнения Фредгольма 1 рода численными методами было разработано специализированное программное обеспечение «BSpectr» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664008), позволяющее на основе четырех итерационных методов (Gravel, ITER, SPUNIT, метод максимального правдоподобия), осуществлять восстановление энергетического спектра нейтронов с последующим переходом к дозиметрическим величинам. Дополнительно были проведены исследования влияния изготовленных блоков регистрации путем введения поправочных коэффициентов, учитывающих неоднородность поля нейтронов в месте проведения измерений, скоростей счета в поле нейтронного источника, а также влияние учета дополнительных влияющих факторов, связанных с конструкцией блока регистрации.

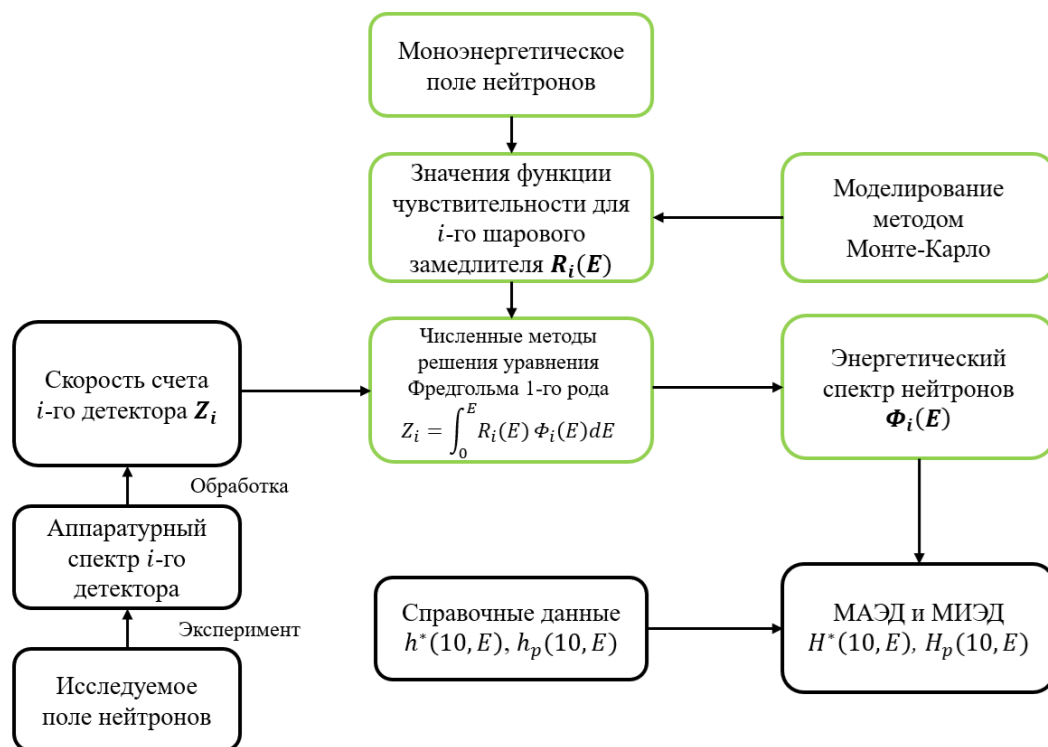


Рисунок 9 – Схема измерения единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения

На подготовительной стадии разработки аппаратно-методического комплекса были проведены исследования значений функций чувствительности $R_i(E)$ детекторов, входящих в его состав, с помощью компьютерного моделирования методом Монте Карло, на основе разработанного программного обеспечения «ResFunction» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663761). Моделирование проводилось моноэнергетическими нейтронами для расширенного набора энергетических групп с 47 до 227 в диапазоне энергий от $1 \cdot 10^{-9}$ до 20 МэВ. Для расчетов использовались библиотеки ядерных данных ENDF/B-VIII [13]. Значения функций чувствительности при этом определяются как число ядерных реакций в единицу флюенса нейтронов на основе оценки длины пробега в объеме детектора, нормированного на одну исходную частицу. На основе физических принципов регистрации нейтронов формула значений функций чувствительности представлена следующим образом:

$$R_i(E) = S_i NV \int_0^E \sigma(n, a) \Phi_E(E) dE \quad (7)$$

где S_i – площадь источника, соответствующего сфере диаметром d_i (м^2), N – атомная концентрация ядер детектора (м^{-3}), V – объем детектора (м^3), $\sigma(n, a)$ – сечение реакции (м^2), по которой рассчитываются значения функций чувствительности, $\Phi_E(E)$ – дифференциальный полный флюенс нейтронов ($\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) с энергией E в объеме детектора, определяемого картой f_4 , где расчет интеграла производится с использованием F_m карты.

Для подтверждения правильности выполнения компьютерного моделирования значений функций чувствительности детекторов, было проведено сравнение результатов расчета для сцинтилляционного детектора $\text{LiI}(\text{Eu})$ с результатами, полученными в международных лабораториях [21-22]. Результаты сравнения представлены на рисунках 10 и 11. Характер функций совпадает, однако присутствуют отличия в численных значениях, которые являются следствием различия геометрии блока детектора, диаметров шаровых замедлителей, а также состава и размера детектора.

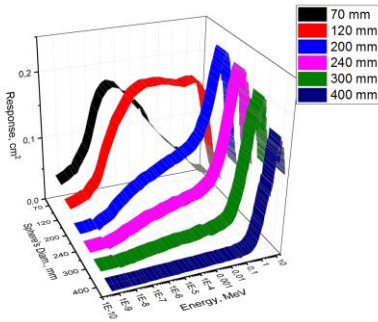


Рисунок 10 – Значения функций чувствительности литиевого сцинтиллятора

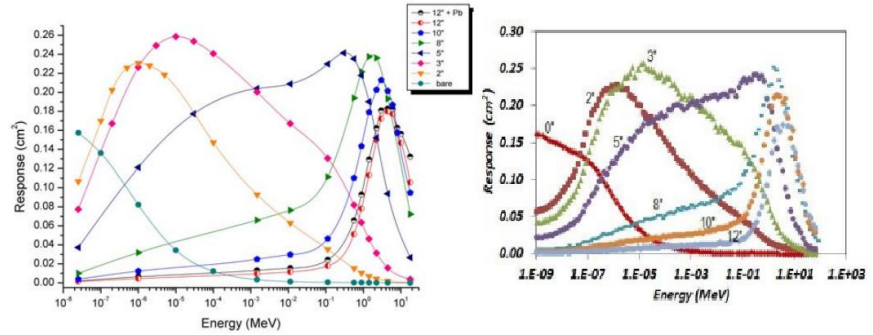


Рисунок 11 – Значения функций чувствительности $\text{LiI}(\text{Eu})$, представленных в работах [21-22]

Метод восстановления энергетического спектра нейтронов при использовании многосферового спектрометра основан на решении интегрального уравнения Фредгольма 1 рода [23] по экспериментальным значениям скоростей счета Z_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, 6$ – количество детекторов, $j = 1, 2, \dots, 8$ – количество шаровых замедлителей с соответствующими значениями функцией чувствительности $R_{ij}(E)$ для i детектора:

$$\begin{cases} Z_{11} = \int_{1 \cdot 10^{-3}}^{20} R_{11}(E) \cdot \Phi(E) dE, \\ Z_{12} = \int_{1 \cdot 10^{-3}}^{20} R_{12}(E) \cdot \Phi(E) dE, \\ \dots \\ Z_{ij} = \int_{1 \cdot 10^{-3}}^{20} R_{ij}(E) \cdot \Phi(E) dE. \end{cases} \quad (8)$$

Для восстановления энергетического спектра нейтронов на основе полученных результатов измерений было разработано программное обеспечение с использованием четырех итерационных методов. Основная задача восстановления энергетического спектра нейтронов сводится к численному решению системы уравнений (8), в котором искомый спектр находится в подынтегральном выражении. Существует несколько методов получения единственного решения таких систем, отличающихся алгоритмами и способами задания и использования

априорной информации. Для реализации приведенных выше итерационных методов использовалось разработанное программное обеспечение «BSpectr».

Результаты исследований метрологических характеристик в виде бюджета неопределенности измерений разработанного аппаратурно-методического комплекса воспроизведения и передачи единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Бюджет неопределенности измерений при воспроизведении и передаче единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения

Источник погрешности, неопределенности	ГЭТ 117-2023	
	$u_A, \%$	$u_B, \%$
Расчет значений функции чувствительности детекторов (R)		2,49
Скорость счета (Z)	1,00	0,64
Погрешность метода восстановления энергетического спектра нейтронов (Φ)		1,74
Погрешность коэффициентов перехода от энергетического спектра нейтронов в дифференциальной форме, нормированному на полный флюенс к МАЭД и МИЭД ($h^*(10), h_p(10)$)		0,87
Погрешность позиционирования (l)		0,35
Погрешность времени набора спектра импульсов (t)		0,29
Относительная суммарная стандартная неопределенность измерений $u_c, \%$	3,4	
Относительная расширенная неопределенность измерений U при $k = 2, \%$	6,8	

Таким образом, разработанный аппаратурно-методический комплекс для воспроизведения и передачи единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения за счет применения четырех независимых численных методов позволяет осуществить воспроизведение и передачу данных единиц величин на основе измерений энергетического спектра нейтронов в диапазоне энергий от $1 \cdot 10^{-3}$ до 20 МэВ за счет расширенного набора детекторов, шаровых замедлителей и увеличения числа энергетических групп с 47 до 227 с относительной расширенной неопределенностью измерений U при $k = 2$, не превышающей 6,8 %.

В свою очередь, сравнение результатов воспроизведения единиц МАЭД и МИЭД нейтронного излучения, полученных за счет расширенного набора детекторов, шаровых замедлителей и увеличения числа энергетических групп с 47 до 227, позволило уточнить действительные значения данных единиц величин на 2,1 % и 3,5 %, соответственно.

В Заключение приводятся основные выводы и результаты диссертации.

В процессе достижения основной цели работы, решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ методов и средств воспроизведения и передачи единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения.

2. Разработан аппаратурно-методический комплекс для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на основе ионизационного метода регистрации нейтронов.

3. Разработан и исследован методы и средства передачи единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения средствам измерений, применяемым на ядерно-физических установках в нейтронной лучевой терапии.

4. Разработан аппаратурно-методический комплекс для воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения на основе метода восстановления энергетического спектра нейтронов.

5. Исследованы метрологические характеристики разработанных аппаратурно-методических комплексов.

Доказаны положения, выносимые на защиту:

1. Разработан аппаратурно-методический комплекс на основе новой конструкции ионизационных камер, позволяющий расширить верхнее значение границы диапазона

воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения с $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ Гр·с⁻¹, а также уменьшить относительную расширенную неопределенность измерений U при $k = 2$ во всем диапазоне с 4,4 % до 2,7 %.

2. Разработаны метод и средства измерений на основе многоканального блока регистрации, позволяющий осуществлять передачу единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения на ядерно-физические установки в нейтронной лучевой терапии, с относительной расширенной неопределенностью U , не превышающей 2,9 % при $k = 2$.

3. Разработан аппаратурно-методический комплекс для воспроизведения и передачи единиц мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения, позволяющий осуществлять расчет данных единиц величин на основе измерений энергетического спектра нейтронов в диапазоне энергий от $1 \cdot 10^{-3}$ до 20 МэВ за счет расширенного набора детекторов и увеличения числа энергетических групп с относительной расширенной неопределенностью измерений U , не превышающей 6,8 % при $k = 2$.

Решена научная задача, заключающаяся в обосновании, разработке и исследовании методов и средств воспроизведения и передачи единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения для обеспечения единства измерений в области дозиметрии нейтронного излучения.

Таким образом, цель диссертационной работы, которая заключалась в обеспечении единства измерений и требуемой точности измерений единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения путем улучшения метрологических характеристик Государственного первичного эталона единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалентов дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2010, достигнута.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Масляев П.Ф. Использование методов спектрометрии нейтронов при измерении дозиметрических величин / П.Ф. Масляев, **С.Г. Федоров** // Измерительная техника. – 2015. – № 1. – С. 58-61.
2. Масляев П.Ф. Универсальный спектрометр нейтронов / П.Ф. Масляев, **С.Г. Федоров** // АНРИ. – 2017. – № 2(89). – С. 12-17.
3. **Федоров С.Г.** Использование сцинтиллятора на основе литиевого стекла для регистрации нейтронного излучения / С.Г. Федоров // Измерительная техника. – 2018. – № 12. – С. 56-58.
4. **Федоров С.Г.** Расчет значений мощности амбиентного индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения на основе метода определения спектра / С.Г. Федоров, А.В. Берлянд, В.М. Дьяченко // Альманах современной метрологии. – 2021. – № 3(27). – С. 46-61.
5. **Федоров С.Г.** Исследование и анализ ядерно-физических установок и нейтронных полей для формирования требований к средствам передачи мощности поглощенной дозы нейтронного излучения / С.Г. Федоров // Альманах современной метрологии. – 2024. – № 4(40). – С. 161-169.
6. **Федоров С.Г.** Автоматизированная система наполнения полостных камер газами для воспроизведения единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы нейтронного излучения / С.Г. Федоров // Альманах современной метрологии. – 2024. – № 4(40). – С. 107-113.
7. **Федоров С.Г.** Государственный первичный эталон единиц поглощённой дозы, мощности поглощённой дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2023 / С.Г. Федоров, А.В. Берлянд, В.А. Берлянд и др. // Измерительная техник. – 2024. – № 73(10) – С. 4-12.
8. **Федоров С.Г.** Исследование метрологических характеристик разработанного аппаратно-методического комплекса, обеспечивающего передачу единицы мощности поглощенной дозы на установки, применяемые в нейтронной лучевой терапии / С.Г. Федоров // Альманах современной метрологии. – 2025. – № 2(42). – С. 91-97.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

1. **Федоров С.Г.**, Дьяченко В.М. RESFUNCTION // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019663761, 23.10.2019.
2. **Федоров С.Г.**, Дьяченко В.М. BSpectr // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019664008, 29.10.2019.
3. **Федоров С.Г.**, Дьяченко В.М., Левский А.В. AD-NEUTRON // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024669261, 15.08.2024.

Патент на изобретение

Федоров С.Г., Дьяченко В.М. Патент РФ № 2853692 от 25 декабря 2025 г. на изобретение «Блок регистрации нейтронного и гамма-излучений, основанный на сцинтилляционном методе регистрации».

Список литературы

1. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSR часть 3, МАГАТЭ, Вена, 2015 г.
2. Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ от 26.06.2008 г.
3. Закон РФ «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.1996 г.
4. Закон РФ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ от 30.03.1999 г.
5. НРБ-99/2009 «Нормы радиационной безопасности».
6. ОСПОРБ 99/2010 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности».
7. Гримов, А.А. Нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей: диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук: / Гримов Александр Александрович. – Курск, 2015. – 162 С.
8. IAEA TRS-398 rev-1 Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water: Technical report. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2024.
9. ICRU Clinical Neutron Dosimetry-Part: I: Determination of Absorbed Dose in a Patient Treated by External: Report № 45, 1989.
10. Климанов В.А. Дозиметрия ионизирующих излучений / В.А. Климанов, Е.А. Крамер-Агеев, В.В. Смирнов. М: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2015. 740 с. ISBN 978-5-7262-2096-3.
11. Замалетдинова Э.Ю. Сравнительный анализ метод измерения давления / Э.Ю. Замалетдинова, А.И. Егорычев // Вестник казанского технологического университета. – 2014. – Том 17, № 8. – С. 124-127.
12. Масляев, П.Ф. Вопросы метрологического обеспечения измерений дозиметрических характеристик полей быстрых нейтронов: диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук: / Масляев Петр Федорович. – М., 1972. – 172 С.
13. <https://www-nds.iaea.org>.
14. Брегадзе Ю.И., Масляев П.Ф. О погрешности раздельного определения поглощенной дозы нейтронов и гамма-излучения ионизационными камерами // Измерительная техника – 1973. – № 8. – С. 70.
15. Ю.И. Брегадзе, П.Ф. Масляев. Труды ВНИИФТРИ «Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений», вып. 36(66), М., 1978.
16. Великая В.В., Мусабаева Л.И., Старцева Ж.А., Лисин В.А. Быстрые нейтроны 6,3 МэВ в комплексном лечении больных местными рецидивами рака молочной железы, Вопросы онкологии, – Том 61, – с. 583-585, – 2015.
17. Лисин В.А. Способы определения относительной биологической эффективности нейтронов в дистанционной нейтронной терапии, Сибирский онкологический журнал, – Том № 5, – с. 36-41, – 2017.
18. Здравоохранение в России 2023: статистический сборник – Москва, 2023 г.
19. МКРЗ Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
20. IAEA TRS-403 Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes: Technical report. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
21. Cruzate J.A., Carelli J.L., Gregori B. N. Bonner sphere spectrometer // Autoridad Regulatoria Nuclear, Buenos Aires (Argentina). 2011. p. 101-112.
22. Tursinah R., Bunawas, Kim J. Neutron response function of bonner sphere spectrometer with $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ detector // Ganendra. 20. 65-72.
23. Масляев П.Ф., Федоров С.Г. Использование методов спектрометрии нейтронов при измерении дозиметрических величин // Измерительная техника. – 2015. – №1. – С. 58-61.