

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений»
(ФГУП «ВНИИФТРИ»)

На правах рукописи

Берлянд Александр Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ РЕНТГЕНОВСКОГО, ПРОТОННОГО,
ИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ
И ЭНЕРГИИ, ФЛЮЕНСА И ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Менделеево 2026г.

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

Научный консультант:

Титаренко Юрий Ефимович, доктор физико-математических наук начальник лаборатории фундаментальных ядерно-физических исследований НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, г. Москва

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

Клочков Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России)

Борисюк Петр Викторович, доктор физико-математических, заведующий кафедрой «Физико-технические проблемы метрологии» (№ 78) Института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»

Защита состоится _____ 2026 года в _____ часов на заседании диссертационного совета 32.1.004.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, Московская область, г. Солнечногорск, р.п. Менделеево.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» (www.vniiftri.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Московская область, г. Солнечногорск, р.п. Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», Ученому секретарю диссертационного совета 32.1.004.01.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 32.1.004.01,

кандидат физико-математических наук

М. В. Балаханов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Ионизирующие излучения (ИИ) применяются для решения широкого круга задач. Атомная энергетика обеспечивает государство электроэнергией, ядерная медицина позволяет диагностировать и лечить обширный перечень заболеваний, радиационные технологии дают возможность исследовать свойства материалов и создавать новые, осуществлять контроль технологических процессов, общественной безопасности, ускорительные технологии позволяют создавать новые химические элементы, моделировать условия пребывания объектов в космическом пространстве.

Для достижения требуемого результата применения ИИ необходимо проводить измерения различных параметров ИИ, при этом требования к точности измерений зависят от области применения ИИ. В данной работе внимание уделено требованиям метрологического обеспечения двух направлений: ядерной медицины и космической отрасли.

В ядерной медицине ключевой величиной является поглощенная доза (ПД) ИИ. требования к точности измерений в клинической дозиметрии для целей лучевой терапии наиболее высокие. Для успеха лучевой терапии требуется, чтобы погрешность значения поглощённой дозы не превышала 3 %. На практике применяются радиационные установки с радионуклидными источниками для дистанционного облучения новообразований глубокого залегания, рентгеновские терапевтические установки применяются для лечения поверхностных образований, ускорители протонов и ионов углерода применяются для облучения таких критически важных областей как головной мозг, брахитерапевтические установки используются для внутрисполостного облучения новообразований.

При этом для разных типов лучевой терапии необходимы различные подходы к обеспечению требуемой точности измерений ПД. Это обусловлено разницей во взаимодействии различных видов излучения с веществом.

К моменту начала работы сложилась ситуация, при которой в Российской Федерации единство измерений ПД обеспечивал Государственный первичный эталон ПД фотонного и электронного излучения ГЭТ 38-95. Что позволяло обеспечить прослеживаемость результатов измерений ПД к первичному эталону для излучения радионуклидных установок для дистанционного облучения. Остальные виды излучений, применяемые при лучевой терапии, не были обеспечены прослеживаемостью. На практике это приводило к применению онкологическими центрами разных средств измерений и разных методов оценки результатов измерений. Основным международным документом, применяемым медицинскими физиками для измерений ПД в клинической дозиметрии, является

В основу этого документа заложен подход к прослеживаемости результатов измерений ПД, основанный на воспроизведении единицы ПД в поле радионуклида ^{60}Co абсолютным методом с последующим переходом к ПД в поле рассматриваемого типа излучения путем применения коэффициентов перехода, зависящих от типа излучения. Такой подход обусловлен соображениями экономической эффективности достигаемых результатов, при этом он обладает рядом недостатков, более подробное рассмотрение которых, будет приведено в первой главе. При таком подходе к измерениям значения погрешностей методов измерений для некоторых видов излучений и диапазонов энергий составляли на уровне 8 %, что значительно превышало приемлемые границы.

Протонная и ионная терапия позволяет точно воздействовать на опухолевые ткани с меньшей нагрузкой на здоровые участки по сравнению с традиционной радиотерапией. Для эффективного лечения важно точно измерять дозу, энергию и пробеги частиц при планировании облучения.

Достоверное знание значения энергии частиц и значения пробега частиц в ионной терапии чрезвычайно важно для успеха лучевой терапии. Значение пробегов частиц определяет глубину проникновения излучения в тело человека и является основой при планировании облучения пациента. Ошибка в значениях пробегов частиц, возникающая при использовании недостоверного метода, может приводить к погрешности в значении ПД для пациента в 10-15 %.

С учетом того, что в Российской Федерации по статистике на учете по онкологическим заболеваниям состоят порядка 3 млн человек и каждый год выявляется порядка 0,5 млн новых случаев, роль метрологии в данной области, без которой невозможно качественное лечение, приобретает существенное значение для обеспечения высокотехнологичной медицины в стране.

В космической отрасли необходимо учитывать влияние ионизирующего космического излучения на электронные компоненты оборудования. Для минимизации риска отказов электронная-компонентная база (ЭКБ) проходит испытания на радиационную стойкость с контролем параметров излучения, при этом погрешность измерений не должна превышать 10 %.

К моменту начала работы измерения значений энергии, плотности потока и флюенса тяжелых заряженных частиц не были обеспечены прослеживаемостью к первичным эталонам ввиду отсутствия эталонов соответствующих величин. Для измерений при испытаниях на радиационную стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц применялись не согласованные между собой методы и средства измерений.

Таким образом, возникло противоречие между существовавшим состоянием эталонной базы и повышением требований к обеспечению единства измерений параметров ионизирующих излучений для целей лучевой терапии и испытаний ЭКБ на радиационную стойкость.

Объект и предмет исследований

Объектом исследований является система обеспечения единства измерений ПД в пучках рентгеновского, протонного, ионного излучений и при брахитерапии, энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц.

Предметом исследований являются методы, алгоритмы воспроизведения и передачи единиц ПД в пучках рентгеновского, протонного, ионного излучений и при брахитерапии, энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц.

Проблема

Несоответствие системы обеспечения единства измерений ПД в пучках рентгеновского, протонного, ионного излучений и при брахитерапии, энергии, флюенса и плотности потока ТЗЧ, современным требованиям научно-технологического развития РФ.

Цель работы

Обеспечение единства измерений ПД низкоэнергетического рентгеновского, протонного, ионного излучений и энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц в соответствии с современными требованиями в научной, медицинской и космической отраслях в РФ.

Задачи исследования

Провести анализ существующей системы обеспечения единства измерений ПД разных видов излучений, энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц.

Разработать требования к методам и средствам воспроизведения и передачи рассматриваемых в работе единиц величин, которые обеспечивают метрологическую прослеживаемость результатов измерений.

Выбрать и обосновать научно-технические решения, обеспечивающие воспроизведение и передачу рассматриваемых единиц величин.

Разработать метод и средства определения соотношений энергий и пробегов тяжелых заряженных частиц.

Научная новизна

1. Впервые на основе совместного физико-математического моделирования взаимодействия излучения с веществом и теплопереноса установлены количественные закономерности влияния конструктивных и радиационно-физических факторов (искажения

флюенса вакуумными зазорами, потерь энергии на неупругие ядерные взаимодействия и пространственных тепловых градиентов) в квазиadiaбатических графитовых калориметрах при облучении протонами (с энергией до 1000 МэВ) и ионами углерода (до 430 МэВ/нуклон). Выявленные закономерности в сочетании с уточненными значениями отношений тормозных способностей позволили обосновать оптимальные геометрические параметры первичных преобразователей и обеспечить определение ПД в воде с расширенной неопределенностью не более 1,9 % ($k = 2$).

2. Для условий источников, используемых при брахитерапии впервые установлены количественные зависимости процессов теплопереноса и распределения поглощенной энергии в графитовом калориметре концентрического типа с учетом градиентов мощности дозы и собственного нагрева высокоактивного источника. Применение этих данных в сочетании с усовершенствованным методом восстановления реальных спектров фотонного излучения позволило обосновать конструктивное исполнение калориметра и обеспечить расширенную неопределенность воспроизведения ПД в воде 3,2 % ($k = 2$).

3. Решена задача дозиметрии слабопроникающего рентгеновского излучения (5–15 кэВ) на радиационной глубине 7 мг/см². Это достигнуто за счет установления уточненных отношений массовых коэффициентов поглощения энергии, взвешенных по истинным спектрам излучения, восстановленным с помощью разработанного алгоритма и применения графитизированных ПЭТ пленок разной толщины в конструкции разработанной экстраполяционной ионизационной камеры, что позволило получить расширенную неопределенность ПД в воде 2,7 % ($k = 2$).

4. Установлены количественные закономерности процессов поглощения энергии и формирования теплового отклика в первичных калориметрах полного поглощения при воздействии пучков протонов (до 250 МэВ), ионов углерода (до 430 МэВ/нуклон) и тяжелых заряженных частиц (до 5 МэВ/нуклон). Это позволило обосновать параметры калориметров на основе меди и многослойной структуры «свинец–молибден», обеспечивающих полное поглощение кинетической энергии частиц и продуктов их ядерных реакций, и реализовать абсолютное воспроизведение энергии тяжелых заряженных частиц с расширенной неопределенностью 2,4 % ($k = 2$).

5. На основе моделирования электрических полей и радиационного моделирования установлены уточненные закономерности влияния вторичной электронной эмиссии и неполного сбора заряда на измеряемый электрический заряд в цилиндрах Фарадея для пучков протонов (до 250 МэВ), ионов углерода (до 430 МэВ/нуклон) и тяжелых заряженных частиц (до 15 МэВ/нуклон). Полученные зависимости позволили

научно обосновать параметры цилиндров Фарадея, что обеспечило воспроизведение единиц флюенса и плотности потока частиц с прослеживаемостью к государственным эталонам электрического заряда и тока с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ($k = 2$).

6. Впервые в Российской Федерации на уровне государственного первичного эталона создан аппаратурно-методический комплекс, объединяющий применение калориметров полного поглощения, цилиндров Фарадея и устройств поглотителей переменной толщины. Это позволило получить метрологически прослеживаемые соотношения «энергия–пробег» для протонов (30–250 МэВ), ионов углерода (до 430 МэВ/нуклон) и тяжелых заряженных частиц (2–15 МэВ/нуклон), обеспечив экспериментальную верификацию данных международных баз (ICRU, SRIM, NIST) с расширенной неопределенностью определения пробега не более 2,4 % ($k = 2$).

Практическая значимость

1) Обеспечено воспроизведение ПД рентгеновского, протонного и ионного излучений, единиц энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц.

2) Разработанные калориметры обеспечивают подтверждение точности воспроизведения единицы на уровне международных ключевых сличений.

3) Предложена, обоснована и реализована структура усовершенствованного ГЭТ 38 и поверочной схемы, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу единиц ПД, энергии, флюенса и плотности потока ТЗЧ.

4) Реализованы методы, позволяющие осуществлять передачу единиц ПД и МПД в воде клиническим дозиметрам для рентгеновского, протонного, ионного излучений и излучения при брахитерапии с необходимой для качественного лечения пациентов точностью.

5) Проведены успешные испытания с целью утверждения типа средств измерений дозиметра эталонного класса, обеспечивающего измерения ПД фотонного, электронного и протонного излучений для целей лучевой терапии.

6) Проведены предварительные испытания эталонных измерителей энергии и флюенса ТЗЧ.

7) Разработана методика калибровки брахитерапевтических источников ионизирующих излучений по ПД в воде.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение графитизированных ПЭТ пленок разной толщины в конструкции разработанной экстраполяционной ионизационной камеры в совокупности с применением усовершенствованного метода определения реального спектра обеспечивает определение

ПД рентгеновского излучения в воде для энергий от 5 до 15 кэВ с расширенной неопределенностью не более 2,7 % ($k = 2$).

2. Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении уточненных отношений тормозных способностей, обеспечивает воспроизведение ПД протонного и ионного излучений в графите для энергий от 30 до 1000 МэВ с НСП не более 0,9 %, СКО не более 0,4 % и определение ПД в воде с расширенной неопределенностью 1,9 % ($k = 2$).

3. Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении массовых коэффициентов поглощения энергии, уточненных для брахитерапевтических условий, обеспечивает воспроизведение ПД излучения при брахитерапии в графите с НСП не более 0,9 %, СКО не более 0,4 % и определение значения ПД в воде с расширенной неопределенностью не более 3,2 % ($k = 2$).

4. Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении методов моделирования для определения оптимальных параметров первичных преобразователей и поправочных коэффициентов, обеспечивает воспроизведение флюенса и плотности потока частиц ТЗЧ с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ($k = 2$).

5. Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении методов моделирования для определения оптимальных параметров первичных преобразователей и поправочных коэффициентов, обеспечивает воспроизведение энергии ТЗЧ с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ($k = 2$).

6. Совместное применение разработанных калориметров полного поглощения и цилиндров Фарадея с устройствами поглотителей переменной толщины, обеспечивает определение значений пробегов протонов и ТЗЧ с расширенной неопределенностью не более 2,4 %, определение экспериментального соотношения энергий и пробегов с расширенной неопределенностью не более 5 %.

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационных исследований применялись теоретические и экспериментальные методы. Для решения поставленных задач использовались методы калориметрических, ионометрических и спектрометрических измерений.

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных результатов, полученных в работе, подтверждается применением известных методов определения параметров ионизирующих излучений и современных методов обработки экспериментальных данных.

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 ПД и МПД фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц ГЭТ 38-2024.

Внедрение результатов

1) Проведено 3 последовательных совершенствования Государственного первичного эталона ГЭТ 38: в 2011, 2021 и 2024 г. в части:

- расширения нижней границы энергетического диапазона фотонного излучения при воспроизведении единицы ПД до 15 кэВ (Приказ Росстандарта № 294 от 3 мая 2012 г.);
- расширения номенклатуры видов излучений при воспроизведении ПД в область протонного излучения с энергиями от 50 до 250 МэВ (Приказ Росстандарта № 68 от 02 февраля 2021 г.);
- расширения номенклатуры видов излучений при воспроизведении ПД в область излучения ионов углерода и расширения энергетического диапазона протонного и ионного излучений при воспроизведении единицы ПД до диапазона от 30 до 1000 МэВ, а также номенклатуры единиц, производимых ГЭТ: энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц [31] (Приказ Росстандарта № 277 от 02 февраля 2024 г.);

2) Последовательно разработаны и внедрены Государственные поверочные схемы:

- для средств измерений ПД и МПД, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотонного и электронного излучений ГОСТ 8.070-2014 (Приказ Росстандарта № 786-ст от 10 июля 2014 г.);
- для средств измерений ПД и МПД, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотонного и электронного излучений, ПД и МПД протонного излучения (Приказ Росстандарта № 2359 от 26 сентября 2022 г.);
- для средств измерений ПД и МПД фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы фотонного излучения, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц. (Приказ Росстандарта № 2273 от 26 сентября 2024 г.).

3) Разработанные эталонные средства были включены в комплекс эталонной аппаратуры для измерения параметров пучков протонов и тяжелых заряженных частиц для целей лучевой терапии и испытаний на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц при выполнении ОКР «Система-2020» по заданию Росстандарта (Государственный контракт № 120-86/2020 на выполнение опытно-конструкторских работ по совершенствованию системы государственных первичных эталонов и системы обеспечения единства измерений в целом);

4) Проведены испытания с целью утверждения типа универсального дозиметра ПД (фотонного, электронного и протонного излучений);

5) Проведены предварительные испытания эталонных измерителей энергии и флюенса ТЗЧ;

6) Проведена аттестация испытательного оборудования на базе протонного ускорителя;

7) Разработана и аттестована методика измерений «Определение мощности поглощённой дозы в воде от брахитерапевтических источников фотонного излучения МВИ 410/0093-25»

Личный вклад автора

Все научные положения, выносимые на защиту, и результаты, приведенные в настоящей диссертационной работе, получены автором лично или под его руководством. Автором лично была сформулирована проблематика исследования, были поставлены цели и задачи исследования, разработаны методы проведения экспериментов, а также проведены расчеты и анализ всех полученных результатов экспериментов. Автор лично принимал участие в совершенствованиях первичного эталона, разработке поверочных схем. Вклад соискателя является первостепенным во всех главах диссертационной работы.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе:

1) Международная научно-практическая конференция «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений» (2017): сборник трудов Секция № 06 «Измерения ионизирующих излучений» (стр. 188) доклад «Применение государственного первичного эталона ПД фотонного и электронного излучений для дозиметрии терапевтических пучков протонного излучения».

2) Заседание рабочей группы CCRI Strategy Working Group Международного Бюро Мер и Весов (BIPM) (2019): информационное сообщение об актуальном состоянии государственного первичного эталона ПД фотонного и электронного излучений.

3) Международный форум и выставка «Метрология без границ» (2023): доклад «Метрология в здравоохранении» в рамках Круглого стола с Росатомом.

4) Научно-технический семинар «Дозиметрия и радиационное материаловедение» (2024): доклад «Совершенствование системы обеспечения единства измерений параметров ионизирующих излучений для целей лучевой терапии и испытаний ЭКБ на радиационную стойкость».

5) Заседание Исполнительного комитета Межведомственного распределенного центра радиационных испытаний электронной компонентной базы (МРЦРИ) (2023): доклад «Организационные и технические вопросы метрологического обеспечения испытаний ЭКБ в рамках деятельности МРЦРИ».

6) Всероссийская научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации» (2024): доклад «Совершенствование системы обеспечения единства измерений ПД в пучках рентгеновского, протонного, ионного излучений и при брахитерапии, энергии, флюенса и плотности потока протонного излучения и в пучках тяжелых заряженных частиц».

7) Российско-китайский семинар «Метрология в медицине и здравоохранении» в рамках деловой программы Девятого Российско-Китайского ЭКСПО (2025): доклад «Обеспечение прослеживаемости измерений параметров ионизирующих излучений при проведении адронной терапии».

8) Выставка «Метрология без границ» (2025): стенд эталона ГЭТ 38-2024 Государственный первичный эталон единиц ПД и МПД фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц.

9) Научно-техническая конференция «СЕРТИФИКАЦИЯ ЭКБ-2025» (2025): доклад «Совершенствование системы обеспечения единства измерений параметров ионизирующих излучений для целей испытаний ЭКБ на радиационную стойкость»

10) I Международная научная конференция «Источники синхротронного и нейтронного излучения в адронной терапии» (2025): доклад «Обеспечение единства измерений ПД, энергии, флюенса и плотности потока протонов и тяжелых заряженных частиц».

11) IX Всероссийский научно-образовательный конгресс с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» (2026): председательство в секции «Медицинская физика (6) Метрология в радиационной медицине», доклад «Метрологическое обеспечение в лучевой терапии».

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений.

Общий объем работы составляет 381 страницу, включая 102 рисунка, 33 таблицы, библиографию из 282 наименований и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены обоснования актуальности темы диссертационной работы, представлены цель работы, ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен подробный анализ методов и средств определения ПД рентгеновского, протонного, ионного излучения и излучения при брахитерапии, анализ методов и средств определения флюенса, плотности потока и энергии протонного излучения и тяжелых заряженных частиц.

Во второй главе описана разработка методов и средств воспроизведения единицы ПД низкоэнергетического фотонного излучения.

Фотонное излучение низких энергий широко востребовано в медицинской физике и радиобиологии (маммография, брахитерапия, лучевая терапия, таргетное усиление дозы наночастицами). При его поглощении в биологической ткани генерируется каскад вторичных оже-электронов с нанометровым пробегом, сопоставимым с диаметром спирали ДНК. Это обуславливает высокую относительную биологическую эффективность (ОБЭ) излучения и формирование не поддающихся репарации двунитевых разрывов ДНК. Данный эффект позволяет локально уничтожать опухолевые клетки (включая радиорезистентные гипоксические) при минимальном повреждении окружающих здоровых тканей.

Для обеспечения безопасности лечения неопределенность дозиметрических измерений не должна превышать 3 %. Кроме того, существует практическая потребность в проверке средств измерений радиационной безопасности (например, дозиметров ДКР-АТ1103М) в диапазоне от 5 кэВ. При этом воспроизведение единицы ПД в диапазоне низкоэнергетического фотонного излучения (5–15 кэВ) представляет значительные метрологические сложности.

Государственный первичный эталон ГЭТ 38-2024 осуществляет воспроизведение единиц ПД и МПД фотонного излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 50 МэВ. В рентгеновском диапазоне выше 15 кэВ измерения проводятся посредством калориметра в комплексе с графитовой экстраполяционной камерой, интегрированной в графитовый фантом. При снижении энергии ниже 15 кэВ прямые калориметрические методы практически неприменимы из-за крайне малого пробега низкоэнергетических фотонов, не

позволяющего зафиксировать микроскопическое повышение температуры в тонком слое воды или графита.

Для воспроизведения единицы ПД низкоэнергетического фотонного излучения (5-15 кэВ) предложен и реализован ионометрический метод с применением экстраполяционной ионизационной камеры. Реализация метода осуществляется посредством разработанной плоскопараллельной экстраполяционной ионизационной камеры (ЭИК) с тремя конструктивными особенностями: возможность монтажа сменных входных окон из сверхтонких графитизированных пленок, которые обеспечивают требуемую глубину измерения и состояние электронного равновесия, использование тканеэквивалентных материалов в конструкции камеры, что позволяет определять дозу непосредственно в воде, возможность монтажа входного окна, которое позволяет проводить измерения при энергии 15 кэВ, что позволяет сопоставить результаты измерений ЭИК с калориметром из состава ГЭТ 38-2024.

Конструкция ЭИК и выбор материалов были обоснованы результатами применения средств конечно-элементного анализа (COMSOL) и моделирования методом Монте-Карло (Geant4, MCNP). Для обеспечения условий измерений в тканеэквивалентной (водной) среде, детали ЭИК с интегрированным фантомом изготовлены из полиметилметакрилата (ПММА) и полиоксиметилена (ПОМ), которые по электронной плотности и массовой тормозной способности для электронов максимально близки к воде.

Электродами в ЭИК являются входное окно (потенциальный электрод) и собирающий электрод, выполненный из полиэтилентерефталатной (ПЭТ) пленки с нанесенным графитовым покрытием. Радиус собирающего электрода составляет 15 мм, ширина охранного кольца – 15 мм. Электростатическое моделирование в COMSOL Multiphysics подтвердило, что при таких параметрах неравномерность электрического поля в чувствительном объеме не превышает 1 %, а краевые эффекты полностью подавляются.

В конструкции ЭИК предусмотрена возможность смены входного окна. Входные окна изготавливаются из ПЭТ-пленки с графитовым напылением (толщина покрытия 600 нм, 0,12 мг/см²). Толщина пленки варьируется в зависимости от энергии излучения: 4 мкм (0,556 мг/см²) для энергий 5–9 кэВ и 10 мкм (1,39 мг/см²) для энергий в 10 кэВ. Это позволяет минимизировать ослабление первичного пучка и проводить измерения на глубине 7 мг/см² (в водном эквиваленте). При конструировании ЭИК была реализована возможность использования специального сменного входного окна толщиной 350 мкм. Применение такого входного окна позволяет напрямую сопоставить показания разработанной ЭИК со значениями ПД, получаемыми при воспроизведении единицы с

помощью графитового калориметра из состава государственного первичного эталона ПД при энергии рентгеновского излучения 15 кэВ.

На рисунке 1 представлен схематический вид ЭИК, на рисунке 2 представлена трехмерная модель и общий вид ЭИК.

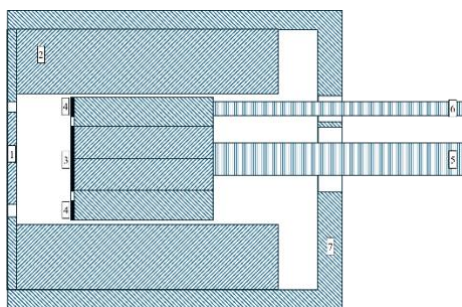


Рисунок 1 – Схематический вид ЭИК:

- 1 – входное окно из графитизированной пленки (потенциальный электрод); 2 – фантом; 3 – собирающий электрод; 4 – охранный электрод; 5 – микрометрическая головка; 6 – электронный индикатор часового типа

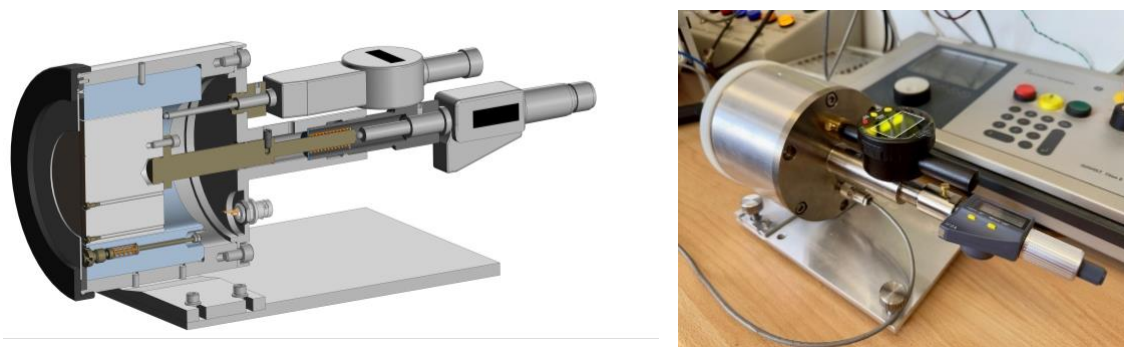


Рисунок 2 – Трехмерная модель и общий вид ЭИК

Определение МПД в воздухе $\dot{D}_{\text{возд}}$ в бесконечно тонком слое базируется на измерении ионизационного тока I в чувствительном объеме камеры при различных значениях воздушного зазора x и вычисляется по формуле:

$$\dot{D}_{\text{возд}} = \frac{W}{e \cdot \rho \cdot S_{\text{эф}}} \left(\frac{dI}{dx} \right)_{x \rightarrow 0} \quad (1)$$

где W/e – средняя энергия, затрачиваемая на образование единичного заряда ионизации в воздухе (для сухого воздуха принимается равной 33,97 Дж/Кл), ρ – плотность воздуха, $S_{\text{эф}}$ – эффективная площадь собирающего электрода, x – расстояние между входным окном камеры и собирающим электродом.

Определение ионизационного тока у поверхности входного окна осуществляется путем построения дифференциальных экстраполяционных кривых отношения ионизационного тока к расстоянию между электродами с последующей экстраполяцией к действительному нулевому зазору. Измерения тока проводятся при варьировании зазора x от 0,5 до 4 мм с шагом 0,01 мм (с помощью прецизионного микрометрического механизма).

Для исключения влияния рекомбинации ионов измерения осуществляются в условиях постоянной напряженности электрического поля (40 В/мм), что обеспечивается пропорциональным изменением прикладываемого к электродам напряжения. Поскольку эффективная площадь собирающего электрода $S_{\text{эф}}$ не совпадает с его геометрической площадью вследствие влияния краевых эффектов, для ее точного определения применяется электрический метод. ЭИК рассматривается как плоский конденсатор, и площадь вычисляется по результатам измерений электрической емкости C при разных расстояниях между электродами на основе соотношения:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{возд}} \cdot S_{\text{эф}}}{x} \quad (2)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_{\text{возд}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость сухого воздуха.

Конечным этапом является переход от МПД в воздухе к МПД в воде $\dot{D}_{\text{вод}}$. Поскольку в диапазоне энергий ниже 10 кэВ условие равновесия вторичных электронов не выполняется и классическое приближение Брэгга–Грея требует корректировки, переход осуществляется через отношение массовых коэффициентов поглощения энергии:

$$\dot{D}_{\text{вод}} = \dot{D}_{\text{возд}} \frac{(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{вод}}}{(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{возд}}} \quad (3)$$

где $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{вод}}$ и $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{возд}}$ – массовые коэффициенты поглощения энергии фотонного излучения для воды и воздуха, усредненные по спектру применяемого рентгеновского пучка.

Для вычисления данных коэффициентов применен усовершенствованный метод восстановления реального спектра рентгеновского излучения. Данный метод предназначен для восстановления реального энергетического спектра из аппаратного спектра полупроводникового CdTe-спектрометра. Исходный спектр искажается за счет конечного разрешения детектора (уширения пика полного поглощения), комптоновского рассеяния, выхода характеристического излучения (escape-пики Cd/Te), а также рассеяния на коллиматоре и обратного рассеяния от фантома. Базовый алгоритм, реализованный в программном обеспечении «Спектр», основывался на калибровке по моноэнергетическим линиям эталонных γ -источников и заключался в последовательном внесении поправок путем поочередного вычитания вкладов данных искажений. Усовершенствование метода заключается в переходе к гибриднему моделированию на основе метода Монте-Карло и регуляризованной развертки. Моделирование взаимодействия излучения с конструкцией детектора и применение экспериментальных данных позволили сформировать непрерывную, физически обоснованную матрицу отклика для решения обратной задачи. Это обеспечивает корректировку всего спектра единым вычислительным процессом, что

снижает неопределенность при определении взвешенных по спектру массовых коэффициентов поглощения энергии, необходимых для перехода от ПД в воздухе к дозе в воде.

Определение геометрических и электрических параметров чувствительного объема ЭИК осуществлялось экспериментальным путем. По результатам измерений электрической емкости C при различных расстояниях между электродами была определена эффективная площадь собирающего электрода $S_{эф}$, значение которой составило $7,163 \text{ см}^2$. Относительная стандартная неопределенность данного параметра оценена в $0,3 \%$, что включает вклады от калибровки моста емкости ($0,20 \%$), непараллельности пластин ($0,20 \%$), краевых эффектов ($0,15 \%$), измерения толщины зазора ($0,12 \%$), повторяемости измерений ($0,10 \%$) и паразитной емкости ($0,05 \%$). Для установления действительного нулевого зазора между электродами получены дифференциальные экстраполяционные кривые зависимости ионизационного тока от ширины воздушного зазора x в диапазоне от $0,5$ до 4 мм при постоянной напряженности электрического поля 40 В/мм . Действительное значение нулевого зазора (x_0) составило $0,096 \text{ мм}$. Соответственно, действительное расстояние между электродами при измерениях вычисляется как $x_d = x - 0,096 \text{ мм}$ (рисунок 3).

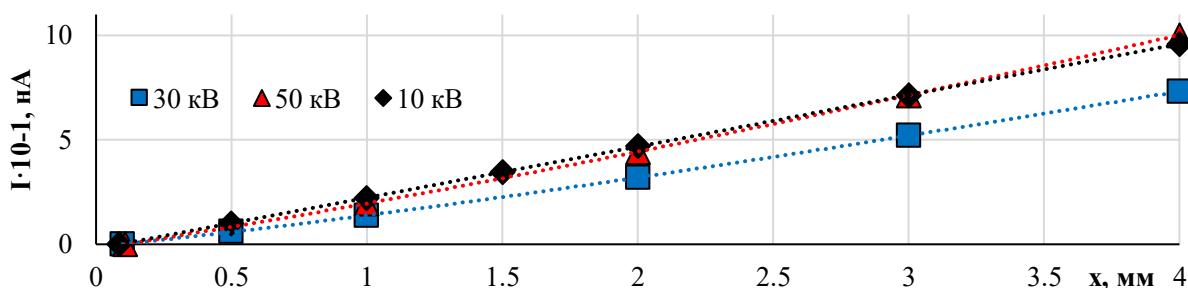


Рисунок 3 – Определение действительного значения нулевого зазора

В таблице 1 приведены составляющие неопределённости при определении мощности поглощённой дозы в воздухе.

Таблица 1 – составляющие неопределённости при определении мощности поглощённой дозы в воздухе

Источник неопределённости	$u_A, \%$	$u_B, \%$
Средняя энергия на ионизацию W/e		0,9
Плотность воздуха (ρ)		0,1
Эффективная площадь собирающего электрода $S_{эф}$		0,3
Производная тока по зазору (полнота сбора заряда) $\frac{dI}{dx}$	0,1	
Прочие (влажность, рекомбинация, др.)		0,2
Суммарная неопределенность	0,98	
Расширенная неопределенность ($k = 2$)	1,96	

В таблице 2 приведены основные составляющие неопределённости при определении поглощённой дозы в воде.

Таблица 2 – Составляющие неопределённости при определении поглощённой дозы в воде

Составляющая	u_A , %	u_B , %
$D_{\text{возд}}$, доза в воздухе	0,1	0,98
Отношение массовых коэффициентов поглощения энергии $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{вод,возд}}$		0,70
Поправка на обратное рассеяние		0,53
Коэффициент возмущения флюенса в полости		0,25
Суммарное значение	1,35	
Расширенная неопределенность ($k = 2$)	2,70	

Составляющая, отвечающая за определение отношений массовых коэффициентов поглощения энергии $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{вод,возд}}$ оценена исходя из применения описанного ранее метода восстановления реального спектра и применения табулированных данных μ_{en}/ρ (таблица 3).

Таблица 3 – Составляющие неопределенности отношений массовых коэффициентов поглощения энергии

Вклад в составляющую	u , %
Статистика CdTe-спектрометра	0,25
Калибровка матрицы отклика спектрометра	0,40
Табличные значения μ_{en}/ρ	0,30

Составляющая, отвечающая за поправку на обратное рассеяние от фантома, рассчитана с применением метода Монте-Карло (BEAMnrc/EGSnrc, $1,5 \cdot 10^8$ историй). В модели учтены истинный спектр трубки при разных напряжениях на трубке.

Составляющая, отвечающая за коэффициент возмущения поля внутри плоскопараллельной экстраполяционной камеры, учитывает влияние геометрического фактора (оценивается в 0,20 %) и влияние входного окна (оценивается в 0,15 %).

Созданная экстраполяционная камера обладает совокупностью характеристик, позволяющих использовать её в качестве первичного средства воспроизведения единицы поглощённой дозы слабопроникающего рентгеновского излучения. Показано, что в диапазоне от 5 до 15 кэВ ЭИК измеряет дозу в воде с меньшей неопределённостью по сравнению со стандартными подходами. ЭИК может служить для калибровки рабочих дозиметров и исследований в области радиационной защиты и рентгеновской диагностики при низких энергиях, заполняя существующий пробел в метрологическом обеспечении дозиметрии мягкого рентгеновского излучения. Достигнутые результаты позволяют включить ЭИК в состав первичного эталона, тем самым расширив его возможности.

Таким образом доказано положение о том, что применение графитизированных ПЭТ пленок разной толщины в конструкции разработанной экстраполяционной ионизационной камеры в совокупности с применением усовершенствованного метода определения реального спектра обеспечивает определение ПД рентгеновского излучения в воде для энергий от 5 до 15 кэВ с расширенной неопределенностью не более 2,7 % ($k = 2$).

В третьей главе описывается разработка методов и средств воспроизведения единицы ПД протонного и ионного излучений.

Среди наиболее востребованных направлений применения протонных и ионных пучков ускорителей можно выделить две актуальные области: адронную лучевую терапию и испытания электронной компонентной базы (ЭКБ) на стойкость к воздействию космического излучения. В лучевой терапии от точности воспроизведения дозы зависит эффективность поражения опухоли. При испытаниях ЭКБ точное знание дозы гарантирует обеспечение требуемого воздействия внутри чувствительной области испытываемого объекта.

Широко применяемый ионометрический метод, регламентированный международными протоколами (например, IAEA TRS-398), требует калибровки ИК в поле радионуклида ^{60}Co с последующим использованием расчетных коэффициентов перехода. Это ограничивает точность измерений из-за высокой неопределенности фундаментальных параметров – средней энергии ионообразования в воздухе (W_{air}) и отношений тормозных способностей для тяжелых частиц. Экспериментальные данные свидетельствуют, что использование ИК в пучках ионов приводит к систематическому занижению дозы на 2–6 % относительно прямых калориметрических измерений.

Для реализации воспроизведения единицы ПД был выбран калориметрический подход, обеспечивающий принцип измерений, максимально приближенный к определению величины. Конструкция первичных преобразователей включает графитовый поглотитель и несколько графитовых оболочек, термоизолированных друг от друга с помощью вакуумных зазоров.

Для определения оптимальных геометрических параметров калориметров проводилось последовательное численное моделирование радиационно-физических и тепловых процессов. На первом этапе методами Монте-Карло (в программных комплексах Geant4, PHITS и FLUKA) рассчитывалось пространственное распределение поглощенной энергии в объеме детектора. Полученное трехмерное дозовое распределение использовалось в качестве источника тепловыделения для конечно-элементного моделирования теплопереноса (COMSOL, ANSYS) (рисунок 4).

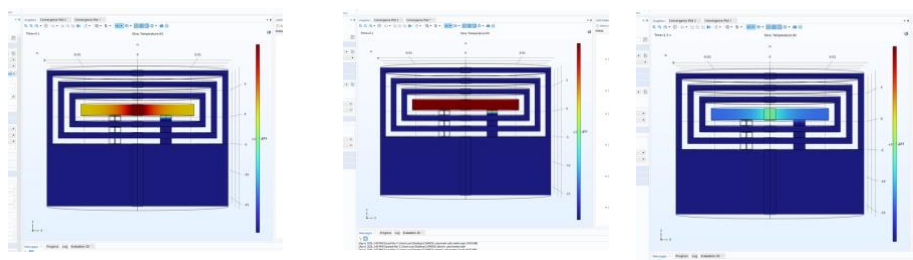


Рисунок 4 – Результаты моделирования распределения тепла в конструкции калориметра

Путем изменения основных параметров конструкции – размеров графитового поглотителя и ширины изолирующих вакуумных зазоров, была подобрана конфигурация, которая обеспечивает минимизацию радиальных и аксиальных температурных градиентов, а также снижает тепловые потери. Внутренние элементы конструкции, трехмерная модель и общий вид протонных калориметров представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внутренние элементы конструкции, трехмерная модель и общий вид протонных калориметров

Определение ПД D (Гр) калориметрическим способом происходит по формуле:

$$D = \frac{IU_T t}{M_{\text{эф}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{рад}}}{\Delta U_{\text{эл}}} \cdot \prod k_i \quad (4)$$

I – сила электрического тока, протекающего через нагревательный элемент поглотителя калориметра во время градуировки калориметра (сила тока определяется по падению напряжения на мере сопротивления P3030), А, U_T – падение напряжения на нагревательном элементе, В, t – продолжительность электрического нагрева поглотителя калориметра, с, $M_{\text{эф}}$ – эффективная масса поглотителя, $\Delta U_{\text{рад}}$ – изменение напряжения в мостовой схеме при

облучении ионизирующим излучением, В, $\Delta U_{эл}$ – изменение напряжения в мостовой схеме при электрическом нагреве, В, $\prod k_i$ – произведение поправочных коэффициентов: $k_{вз}$ – коэффициент, учитывающий искажение флюенса протонов вакуумными зазорами внутри калориметра, $k_{тп}$ – коэффициент, учитывающий потери тепла от поглотителя по подводящим проводам, $k_{гр}$ – коэффициент, учитывающий градиент МПД в радиальном и аксиальном направлении в поглотителе, $k_{тд}$ – коэффициент, учитывающий «тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра.

Поскольку реальная конструкция калориметра отличается от идеализированного однородного графитового фантома, алгоритм определения ПД включает применение ряда поправок, позволяющих учесть физические эффекты, возникающие по этой причине при измерениях.

Для учета вклада инородных материалов (термисторов, компаунда на основе клея и графитового порошка, проводов) эффективная масса поглотителя определялась по формуле:

$$M_{эф} = m_g + \sum m_i \cdot \frac{S_i}{S_g} \quad (5)$$

где m_g – масса чистого графита, m_i – масса i -го компонента, S_i/S_g – отношение массовых тормозных способностей частиц в материале компонента к графиту (на основе данных ICRU 90).

Для уточнения отношений массовых тормозных способностей материалов инородных материалов к графиту (S_i/S_g) был реализован комплексный аналитический подход. Значения формировались путем анализа данных из отчетов ICRU (49, 73, 90), баз PSTAR и программных кодов SRIM/MSTAR. Все имеющиеся данные приводились к единым физическим параметрам: плотности кристаллического графита ($\rho = 2,265 \text{ г/см}^3$) и уточненному среднему потенциалу ионизации ($I = 81 \text{ эВ}$). Итоговые значения для каждой энергии определялись методом взвешенного усреднения, где статистический вес источника задавался обратно пропорционально квадрату его заявленной неопределенности. Для описания зависимости во всем энергетическом диапазоне применялась расширенная формула Бете–Блоха с плотностными и оболочечными поправками, а аналитические участки сшивались через сигмоидные весовые функции для обеспечения непрерывности кривой.

Определение чувствительности калориметра проводилась методом замещения радиационного нагрева электрическим. На встроенный нагревательный элемент подавалась известная с высокой точностью электрическая мощность, что позволило установить точную

связь между температурным откликом измерительного термистора, включенного в мостовую схему, и поглощенной энергией.

Определение поправки на искажение флюенса вакуумными зазорами $k_{вз}$ необходимо для оценки влияния вакуумных полостей на поле излучения. Оценка коэффициента проводилась с помощью моделирования методом Монте-Карло. Расчет выполнялся путем сопоставления ПД в сплошном графитовом фантоме и в реальной геометрии детектора (Рисунок 6).

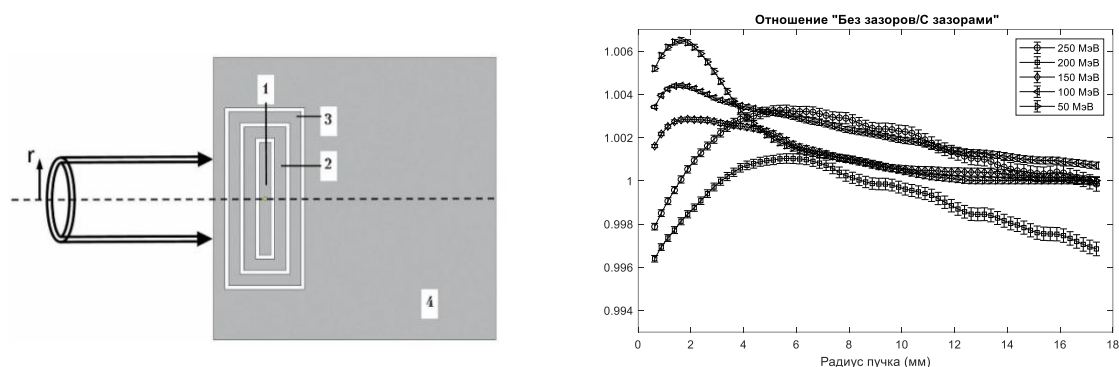


Рисунок 6 – Отношения УЭ в центральной ячейке «без зазоров / с зазорами» в зависимости от радиуса плоского пучка при энергиях протонов 50, 100, 150, 200 и 250 МэВ

Оценка потерь тепла от поглотителя по подводящим проводам $k_{тп}$ основывалась на анализе температурных кривых охлаждения поглотителя после прекращения облучения с экстраполяцией дрейфа температуры к середине интервала облучения и расчетом тепловых потоков по манганиновым проводам с применением конечно-элементного анализа.

Поправка на градиент МПД в радиальном и аксиальном направлении в поглотителе $k_{гр}$, вызванный пространственной неравномерностью пучка, рассчитывалась путем применения пространственного распределения ПД (полученного методом Монте-Карло) в конечно-элементной модели теплопереноса. Коэффициент определялся как отношение средней температуры по объему поглотителя к локальной температуре термистора.

Определение поправки на «тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра $k_{тд}$ необходимо для учета доли поглощенной энергии, расходуемой на радиационно-химические преобразования и образование структурных дефектов (и, как следствие, не переходящей в регистрируемое тепло). Оценка коэффициента проводилась на основе литературных оценок и расчета массовых долей примесей.

Разработка методов и средств перехода к ПД в воде.

Для клинической практики необходимо определять ПД в воде. Для перехода от дозы, измеренной графитовым калориметром $D_{гр}$, к дозе в воде $D_в$ необходимо знать соотношение массовых тормозных способностей воды и графита для соответствующего излучения, а

также учитывать разницу во флюенсе заряженных частиц (вследствие неупругих ядерных взаимодействий) в графите и в воде на эквивалентной глубине (коэффициент $k_{\Phi}(E, z)$):

$$D_{\text{в}} = D_{\text{гр}}(S/\rho)_{\text{в,гр}} k_{\Phi}(E, z) = D_{\text{гр}}(S/\rho)_{\text{в,гр}} \frac{\sum_i \Phi_i^{\text{в}}(E_i, z) (S/\rho)_i^{\text{в}}}{\sum_i \Phi_i^{\text{гр}}(E_i, z) (S/\rho)_i^{\text{гр}}} \quad (6)$$

где $D_{\text{в}}$ – ПД в воде, $D_{\text{гр}}$ – ПД в графите, $(S/\rho)_{\text{в,гр}}$ – отношение массовых тормозных способностей воды и графита, $\Phi_i(E_i, z)$ – флюенс частиц i -го типа с энергией E_i на глубине z в воде и графите $(S/\rho)_{\text{в,гр}}$ – массовые тормозные способности для частиц i -го типа в воде и графите.

Значения отношений тормозных способностей вода и графита для протонов и ионов углерода получены аналогичным описанному ранее способу при определении эффективной массы поглотителя.

Поправка на влияние неупругих ядерных взаимодействий $k_{\text{яр}}$ введена для компенсации различий во флюенсе вторичных частиц в воде и графите на эквивалентных глубинах. Расчет проводился в программном комплексе Geant4 как отношение полных доз к дозам, смоделированным при искусственном отключении неупругих ядерных процессов. При расчете полных доз учитывался вклад сложного спектра вторичного излучения, возникающего в результате ядерных реакций: как продуктов фрагментации первичных частиц (для пучков ионов углерода – более легких ионов вплоть до протонов), так и продуктов фрагментации ядер мишени (вторичных протонов, альфа-частиц, тяжелых ядер отдачи, а также вторичных нейтронов и гамма-квантов).

Исследования позволили определить метрологические характеристики калориметров для воспроизведения ПД протонного и ионного излучения.

Суммарная стандартная неопределенность определения чувствительности графитового калориметра составила 0,09%, включая случайную повторяемость результатов (0,04%), погрешность задания тока (0,02%), дрейф сопротивления термистора (0,03%), неопределенность экстраполяции теплопотерь (0,05%) и шум мостовой схемы (0,05%).

Сравнение данных ICRU 49, ICRU 73 и ICRU 90 (NIST PSTAR) показало, что переход к актуализированным в соответствии с ICRU 90 значениям потенциала ионизации графита с 78 до 81 эВ снизило расчетные значения тормозной способности на 3–4 % в высокоэнергетической области, а переход к плотности графита в 2,265 г/см³ потребовал корректировки значений тормозной способности при энергиях выше нескольких сотен МэВ. В интервале 0,1–1 МэВ учет новых данных скорректировал значения тормозной способности для протонов на 1–2 %.

Применение уточненных значений тормозных способностей позволило осуществить корректное вычисление эффективной массы поглотителя калориметра, реализовать метод перехода от дозы в графите к дозе в воде. Примененные подходы позволили установить непрерывную зависимость значений тормозных способностей во всем исследуемом диапазоне энергий до 1000 МэВ для протонов и до 400 МэВ/нуклон для ионов углерода. Это позволило достичь неопределенности средневзвешенных значений тормозной способности в 0,35%.

Влияние внутренних вакуумных зазоров между поглотителем и защитными оболочками оценено с помощью трехмерного моделирования в средах Geant4 и PHITS. Коэффициент $k_{вз}$ монотонно растет с ростом энергии пучка. Для протонов: от 1,000 (30–60 МэВ) до 1,0036 (230 МэВ) и 1,008 (1 ГэВ). Для ионов углерода эффект выше: от 1,002 (150 МэВ/нуклон) до 1,010 (430 МэВ/нуклон). Это обусловлено тем, что высокоэнергетические частицы генерируют вторичное излучение (включая нейтроны), частично покидающее объем поглотителя. Разброс между кодами Geant4, FLUKA и PHITS не превысил 0,1 %.

Поправка на теплопотери по проводам $k_{тп}$ составила от 1,001 до 0,999 в зависимости от условий облучения с неопределенностью 0,1 %. Результаты исследований метрологических характеристик калориметров приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Составляющие погрешности и неопределенности графитового калориметра при воспроизведении ПД

Источники погрешности и составляющие неопределенности	$S_0 \cdot 10^2$	$\theta_0 \cdot 10^2$	u_{0A}	u_{0B}
$N_{эс}$ чувствительность калориметра, определяемая путем электрической градуировки		0,15		0,09
$M_{эф}$ определение эффективной массы		0,15		0,09
$\Delta U_{рад}$ изменение напряжения в мостовой схеме при облучении ионизирующим излучением	0,4	0,05	0,4	0,03
$k_{вз}$ искажение флюенса протонов вакуумными зазорами внутри калориметра		0,5		0,3
$k_{тп}$ потери тепла от поглотителя по подводящим проводам		0,2		0,12
$k_{гр}$ градиент МПД в радиальном и аксиальном направлении в поглотителе.		0,1		0,06
$k_{то}$ «тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра.		0,3		0,17
Суммарные значения	0,4	0,5	0,49	
НСП ($P = 0,99$)		0,7		

Анализ составляющих неопределенности поправочного коэффициента $k_{яр}$, введенного для учета процессов неупругих ядерных взаимодействий при переходе от ПД в графите к ПД в воде, показал, что суммарная стандартная неопределенность коэффициента

не превышает 0,3 % для протонных пучков и 0,4 % для углеродных, что позволяет осуществить переход от дозы в графите к дозе в воде с использованием средневзвешенного отношения тормозных способностей с требуемой точностью.

Сводный бюджет неопределенности метода перехода к водной среде представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Составляющие неопределенности при переходе к ПД в воде

Составляющие относительной стандартной неопределенности	$u_{A,i}, \%$	$u_{B,i}, \%$
$D_{гр}$ определение ПД в графите		0,49
$S_v/S_{гр}$ отношение тормозных способностей		0,30
$k_{фл}$ искажение флюенса протонов		0,50
$k_{яр}$ влияние неупругих ядерных взаимодействий		0,40
Стабильность монитора	0,20	
Суммарная неопределенность		0,93
Расширенная неопределенность ($k = 2$)		1,9

Таким образом доказано положение о том, что разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении уточненных отношений тормозных способностей, обеспечивает воспроизведение поглощенной дозы протонного и ионного излучений в графите для энергий от 30 до 1000 МэВ с НСП не более 0,9 %, СКО не более 0,4 % и определение поглощенной дозы в воде с расширенной неопределенностью 1,9 % ($k = 2$).

В четвертой главе описывается разработка методов и средств воспроизведения единицы ПД излучения при брахитерапии.

Для успеха терапии с применением брахитерапевтических источников, как и для любого вида лучевой, терапии требуется высокая точность дозиметрического обеспечения.

Традиционно калибровка брахитерапевтических источников выполняется через мощность воздушной кермы на расстоянии 1 м (RAKR), на основе которой ПД в воде определяется косвенно – с применением переходного коэффициента (дозовой постоянной Λ). Такой подход вносит существенную неопределенность. Значение Λ для каждого типа источника определяется комбинацией измерений (ИК или ТЛД) и моделирования Монте-Карло с последующим усреднением (consensus dataset). Стандартная неопределенность этих величин может достигать 4,8%, а расширенная 9–10% ($k = 2$), что является преобладающим вкладом в итоговый бюджет неопределенности дозы в воде. Для низкоэнергетических фотонных источников (например, ^{125}I) ситуация усугубляется: расширенная неопределенность измерения RAKR может достигать 3,8% ($k = 2$). В результате данный метод затрудняет обеспечение требуемой для лучевой терапии точности.

Для решения задачи реализован подход, при котором ПД от брахитерапевтических источников воспроизводится графитовым калориметром с последующим переходом к ПД

в воде. Реализация калориметрического принципа сопряжена с физическими и конструктивными трудностями. В брахитерапии точка определения дозы находится в одной среде с высокоактивным источником на расстоянии 1 см от него, что обуславливает высокие градиенты дозы и неравномерное облучение поглотителя калориметра. Кроме того, самонагрев радиоактивного источника при распаде и его близость к поглотителю могут приводить к искажению калориметрической кривой из-за инфракрасного излучения.

Выбрана концентрическая конструкция калориметра с кольцевым графитовым поглотителем, обеспечивающая пространственное усреднение поглощенной энергии. Такая геометрия нивелирует анизотропию излучения источника и компенсирует локальные изменения дозовой нагрузки при смещении источника относительно оси поглотителя. Проектирование геометрии и выбор материалов проводились на основе двухэтапного численного моделирования. На первом этапе моделирование с помощью кода EGSnrc (модуль DOSRZnrc, спектр излучателей от высокоэнергетических гамма-источников (>100 кэВ) до низкоэнергетических нуклидов (<100 кэВ) и миниатюрных рентгеновских трубок (INTRABEAM, Xoft Axxent)) позволило определить пространственное распределение дозы в кольцевом поглотителе и оценить самонагрев капсулы источника, достигающий нескольких милливатт. Полученные данные об энерговыделении позволили задать параметры объемного источника тепла для последующего теплового анализа.

Моделирование тепловых процессов в конструкции калориметра во время облучения было проведено с применением программного пакета конечно-элементного анализа COMSOL, позволяющего анализировать тепловые процессы в трехмерной геометрии с учетом вакуумных зазоров, лучистого теплообмена и утечки тепла по подводящим проводам (рисунок 7).

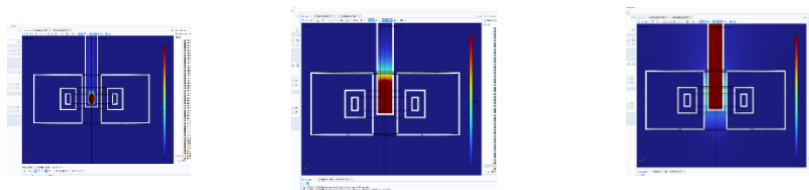


Рисунок 7 – Моделирование распределения тепла по объему конструкции калориметра

Модель теплопереноса позволила оценить распределение температурных полей по объему конструкции в динамике – при условии роста температуры в разных точках калориметра в течение типичного сеанса облучения (несколько минут непрерывного нахождения источника в центре).

Результаты анализа подтвердили целесообразность применения алюминиевого источникопровода для отвода тепла от источника и его рассеивания вне поглотителя. По результатам моделирования выбран радиус кольцевого поглотителя, равный 25 мм. Такая

геометрия минимизирует тепловое влияние высокоактивного источника, обеспечивая достаточный для измерений уровень мощности дозы. Поглотитель выполнен в форме цилиндрического тора (толщина 2 мм, высота 5 мм), что соответствует длине активной части типичных HDR-источников и минимизирует градиент дозы по толщине. Внутренние элементы и внешний фантом (диаметр 20 см, высота 14 см) изготовлены из высококачистого графита. Центральный алюминиевый источникопровод эффективно отводит тепло от источника за пределы чувствительной области. Для термической изоляции между алюминиевой трубкой и графитовыми блоками предусмотрен зазор 0,25 мм. Модель, внешний вид и составные части графитового калориметра представлены на рисунке 8.

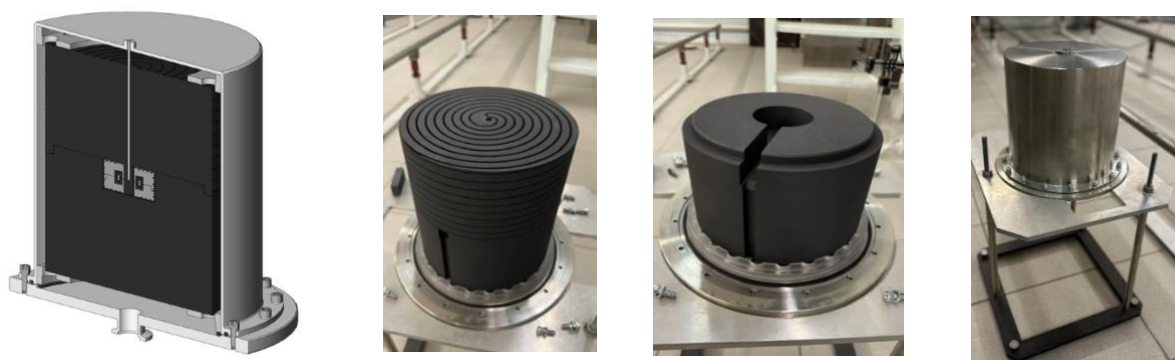


Рисунок 8 – Модель, внешний вид и составные части графитового калориметра

Воспроизведение ПД в графите базируется на сопоставлении радиационного и калибровочного электрического нагрева поглотителя. Измерение температурного отклика осуществляется посредством регистрации изменения напряжения ($\Delta U_{\text{рад}}$, $\Delta U_{\text{эл}}$) в мостовой измерительной схеме:

$$D_{\Gamma} = \frac{I \cdot U_T \cdot t}{M_{\text{эф}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{рад}}}{\Delta U_{\text{эл}}} \cdot k_{\text{вз}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{гр}} \cdot k_{\text{тд}} \cdot k_{\text{ндр}} \quad (7)$$

где $M_{\text{эф}}$ – эффективная масса поглотителя, $\Delta U_{\text{рад}}$, $\Delta U_{\text{эл}}$ – изменение напряжения в мостовой схеме под действием радиационного и электрического нагрева, $k_{\text{вз}}$ – учет искажения флюенса фотонов вакуумными зазорами, $k_{\text{тп}}$ – учет потери тепла от поглотителя по подводящим проводам, $k_{\text{гр}}$ – учет градиента МПД в поглотителе, $k_{\text{тд}}$ – учет «теплового дефекта» в материалах поглотителя, $k_{\text{ндр}}$ – учет неоднородности конструкции (воздух, металл, графит).

Понятие эффективной массы поглотителя вводится для того, чтобы учесть присутствие в поглотителе инородных материалов - термисторов, проволоки, клеевого компаунда и т. д., которые взаимодействуют с излучением иначе, чем графит.

Для определения эффективной массы поглотителя применялись соотношения массовых коэффициентов поглощения энергии $\frac{(\mu_{\text{ен}}/\rho)i}{(\mu_{\text{ен}}/\rho)_{\text{гр}}}$ графита и материалов (i), входящих в поглотитель:

$$M_{\text{эф}} = m_{\text{гр}} + \sum m_i \frac{(\mu_{\text{ен}}/\rho)_i}{(\mu_{\text{ен}}/\rho)_{\text{гр}}} \quad (8)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса чистого графита в поглотителе, m_i – масса i -го компонента.

Учитывая то, что значения $\mu_{\text{ен}}/\rho$ для рентгеновского излучения сильно зависят от спектра излучения, для определения соотношений, входящих в выражение (2), был применен разработанный автором усовершенствованный метод восстановления спектра рентгеновского излучения, что позволило определить соответствующие соотношения, взвешенные по реальному спектру излучения.

Для вычисления данных коэффициентов применялся усовершенствованный метод восстановления реального спектра рентгеновского излучения на основе аппаратных данных, полученных с помощью полупроводникового детектора на основе CdTe. Искажения в первичных спектрах обусловлены аппаратным уширением пиков полного поглощения, эффектами комптоновского и обратного (от фантома) рассеяния, вылетом характеристического излучения кадмия и теллура (escape-пики), а также рассеянием на элементах коллиматора. В базовой модификации алгоритма исправление данных реализовывалось как цепочка последовательных вычитаний вкладов от моноэнергетических реперных γ -источников. В усовершенствованной версии реализована гибридная схема, объединяющая методы Монте-Карло и алгоритмы регуляризованной развертки. Путем численного моделирования прохождения излучения через узлы детектора с применением экспериментальных данных создается непрерывная матрица отклика детектора.

Введение поправки, учитывающей искажения флюенса вакуумными зазорами ($k_{\text{вз}}$) обусловлено тем, что для обеспечения квазиadiaбатических условий графитовое кольцо поглотителя физически отделено от защитных оболочек вакуумными зазорами. Наличие этих зазоров вносит искажение во флюенс фотонов, поскольку вакуум лишен рассеивающей и поглощающей среды, что приводит к изменению вторичного электронного поля. Оценка коэффициента $k_{\text{вз}}$ проводилась методом Монте-Карло в среде PHITS (рисунок 9).

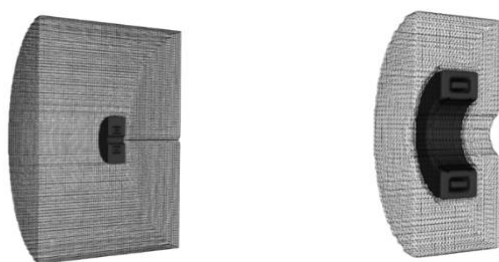


Рисунок 9 – Модель калориметра, построенная в среде PHITS

Необходимость введения поправки на неоднородность конструкции ($k_{\text{ндр}}$) продиктована тем, что в отличие от классической геометрии калориметра, облучение кольцевого поглотителя происходит через ряд инородных элементов (воздух, стенки алюминиевой трубки для источника). Коэффициент $k_{\text{ндр}}$ компенсирует искажения распределения дозы, возникающие на пути от источника до поглотителя. Расчет данной поправки также опирается на моделирование взаимодействия излучения с конструкцией калориметра в среде PHITS.

Потери тепла из поглотителя по подводящим проводам минимизированы за счет использования манганиновых проводов диаметром 0,05 мм. Этот сплав обладает низкой теплопроводностью, а его сопротивление практически не зависит от температуры. Оставшаяся часть паразитных утечек тепла учитывается с помощью коэффициента $k_{\text{тп}}$, который определяется путем анализа сигнала калориметра до, во время и после облучения. Участки температурной кривой, отражающие дрейф температуры до и после облучения, экстраполируются к середине интервала облучения. Разница между экстраполированными кривыми в этой средней точке дает изменение температуры под действием облучения, из которого математически исключены теплотери. Отношение этого идеального (экстраполированного) подъема к фактически зарегистрированному и представляет собой коэффициент теплотери. Значение коэффициента, полученное экспериментально, сопоставлялось с результатами моделирования процессов теплопередачи.

Поправка, учитывающая градиент МПД ($k_{\text{гр}}$), вносится ввиду того, что дозовое поле брахитерапевтического источника обладает резким пространственным градиентом, а поглотитель усредняет дозу по своему объему. Поправка учитывает разницу между усредненной по объему температурой и температурой в точке расположения измерительного термистора. Значение поправки определялось путем совместного моделирования радиационного транспорта излучения и теплового моделирования.

В результате исследований были определены значения поправочных коэффициентов, применяемых в уравнении воспроизведения единицы ПД. Результаты расчета поправки на искажение флюенса фотонов вакуумными зазорами ($k_{\text{вз}}$), выполненных в среде PHITS: 1,0120 (^{103}Pd (22 кэВ)), 1,0235 (^{125}I (28 кэВ)), 1,0275 (^{131}Cs (30 кэВ)), 1,0076 (^{192}Ir (380 кэВ)), 1,0041 (^{137}Cs (662 кэВ)), 1,0014 (^{60}Co (1250 кэВ)).

Выявлена зависимость вклада влияния вакуумных зазоров в калориметре от спектрального состава излучения. По мере уменьшения энергии излучения вклад искажении флюенса фотонов в вакуумных полостях калориметра возрастает (рисунок 10).

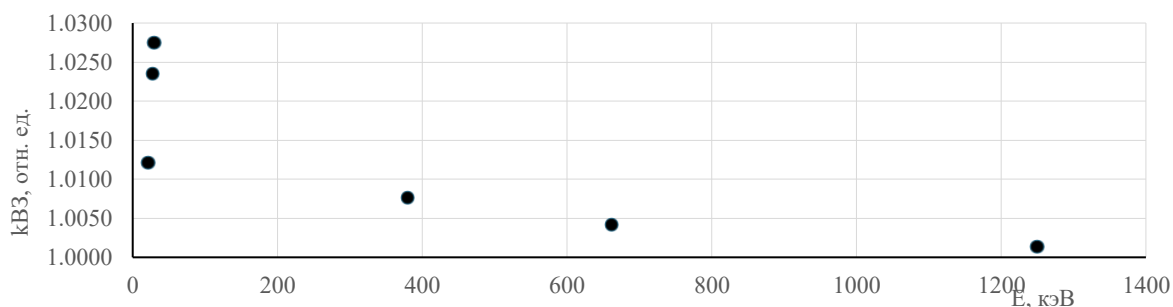


Рисунок 10 – Зависимость значения поправочного коэффициента на искажение флюенса фотонов вакуумными зазорами от энергии

Полученная зависимость поправочного коэффициента $k_{вз}$ от энергии обусловлена изменением характера рассеяния фотонов в среде. В области промежуточных энергий (^{131}Cs) изотропный характер комптоновского рассеяния приводит к частичной утечке рассеянных квантов через вакуумные зазоры калориметра. При дальнейшем снижении энергии до 22 кэВ (^{103}Pd) в графите начинает доминировать фотоэлектрическое поглощение. Падение доли комптоновского рассеяния снижает вклад вторичного излучения в общую дозу в обеих моделях, что нивелирует влияние вакуумных зазоров и приводит к уменьшению коэффициента $k_{вз}$.

На основе проведенных исследований метрологических характеристик калориметра была выполнена оценка составляющих погрешности определения ПД в графите (таблица 6).

Таблица 6. Оценки составляющих погрешности определения ПД в графите от источников для брахитерапии

Источники погрешности,	S_0 , %	Θ_0 , %
Чувствительность калориметра	0,15	0,4
Определение эффективной массы поглотителя $M_{эф}$		0,3
Изменение напряжения с мостовой схемы $\Delta U_{рад}$	0,4	0,05
Поправка на искажение флюенса вакуумными зазорами $k_{вз}$		0,3
Поправка на потери тепла по подводящим проводам $k_{тп}$		0,2
Поправка на градиент МПД $k_{гр}$		0,1
Поправка на «тепловой дефект» в материалах $k_{тд}$		0,3
Поправка на неоднородность конструкции $k_{ндр}$		0,01
Суммарные значения	0,4	0,59

Метод определения ПД в воде основан на определении МПД в графите с последующим переходом к МПД в воде с помощью ИК (ИК) и специализированного набора фантомов со вставками. На первом этапе ПД с высокой точностью измеряется напрямую путем помещения брахитерапевтического источника в графитовый калориметр концентрической конструкции. На втором этапе выполняется калибровка ИК в спроектированных графитовом и водном фантомах. Графитовый фантом изготовлен из высокочистого графита (однородность плотности не хуже 0,05 %), что минимизирует

искажение спектра излучения; водный фантом выполнен в виде куба из водозэквивалентного материала.

Процедура калибровки предусматривает последовательное размещение источника и ИК в графитовом, а затем в водном фантомах в условиях подобия спектра и геометрии излучения (рисунок 11). Воспроизводимость геометрии и совпадение осей «источник–ИК» обеспечивают специальные вставки, изготовленные с допусками для диаметра посадочного гнезда камеры $\pm 0,01$ мм; для диаметра канала под источник $\pm 0,01$ мм; линейный размер между осями отверстий $\pm 0,02$ мм. Для каждого радионуклида (i) применяется свой набор вставок с расстояниями (r_{Gi} и r_{Bi}), обеспечивающими эквивалентность геометрии измерений в фантомах геометрии измерений в калориметре.

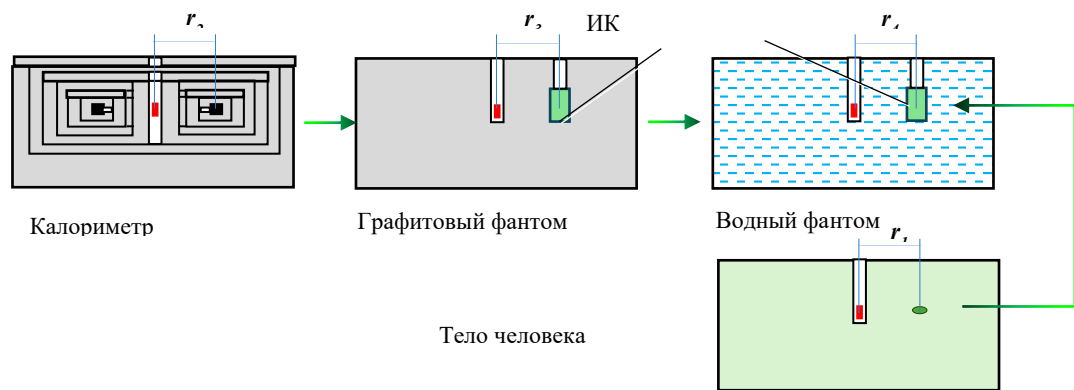


Рисунок 11 – Процедура определения ПД в воде

Переход к ПД в воде осуществляется по следующему соотношению:

$$D_B = D_G \frac{I_B (\mu_{en}/\rho)_B}{I_G (\mu_{en}/\rho)_G} p_{B,G} \quad (9)$$

где D_G – МПД в графите, полученное по результатам измерений ИК, откалиброванной с помощью графитового калориметра; I_B/I_G – отношение ионизационных токов камеры в водном и графитовом фантомах; $(\mu_{en}/\rho)_B/(\mu_{en}/\rho)_G$ – отношение массовых коэффициентов поглощения энергии для воды и графита; $p_{B,G}$ – поправка на замещение воды графитом (отражает влияние различий между средами на величину поглощённой дозы, представляет собой произведение $p_{B,G} = \Psi_{B,G} \beta_{B,G}$). $\Psi_{B,G}$ – поправка на возмущение поля фотонного излучения, учитывающая различие флюенса и энергетических спектров первичных и рассеянных фотонов в эквивалентных точках водного и графитового фантомов, обусловленное разницей эффективных атомных номеров и транспортных характеристик этих сред. Для минимизации различий в спектральном составе и флюенсе фотонов в точке измерения, графитовый и водный фантомы спроектированы с использованием метода эквивалентных глубин, обеспечивающего максимальное подобие полей излучения (за счет сменных вставок для ИК). Благодаря этому конструктивному решению значение поправки $\Psi_{B,G}$ стремится к единице. Однако, в связи с различием эффективных атомных номеров воды

и графита (что критично для спектров с высокой долей низкоэнергетических квантов, где преобладает фотоэлектрическое поглощение), остаточные различия в энергетических спектрах фотонов $\Phi(E)$ рассчитываются методом Монте-Карло (Geant4) и учитываются коэффициентом $\Psi_{в,г}$. Коэффициент $\beta_{в,г}$ представляет собой отношение $\beta_{в}/\beta_{г}$, учитывающее различие в переносе вторичных электронов и степени нарушения локального электронного равновесия в водной и графитовой средах. Для низкоэнергетических источников пробег вторичных электронов пренебрежимо мал, что обеспечивает условия полного электронного равновесия в обеих средах ($\beta_{в,г} = 1$). Для высокоэнергетических брахитерапевтических источников имеет место переходное электронное равновесие, однако различия транспортных характеристик вторичных электронов в воде и высокочистом графите минимальны. В связи с этим, значение отношения $\beta_{в,г}$ для всего рассматриваемого диапазона энергий принимается равным 1 с включением соответствующей составляющей неопределенности (в совокупности с составляющей неопределенности $\Psi_{в,г}$, не превышающей 0,1 %) в общий бюджет погрешности при переходе от графита к воде.

Для низкоэнергетического рентгеновского излучения в силу высокой зависимости от энергии массовых коэффициентов поглощения энергии (в диапазоне до 100 кэВ) был применен усовершенствованный метод восстановления спектра. Это позволило осуществить расчет взвешенных по реальному спектру рентгеновского излучения массовых коэффициентов поглощения энергии:

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\Phi} = \frac{\int \Phi(E) \cdot (\mu_{en}/\rho)(E) dE}{\int \Phi(E) dE} \quad (10)$$

где $\Phi(E)$ – энергетический спектр фотонов, а значения $(\mu_{en}/\rho)(E)$ заимствованы из открытых баз данных. Для низкоэнергетического излучения (в том числе от рентгеновских аппаратов) отношение массовых коэффициентов поглощения энергии $(\mu_{en}/\rho)_{в}/(\mu_{en}/\rho)_{г}$ может достигать значений 2,36–2,46. Сильная зависимость этих коэффициентов от спектрального состава в диапазоне энергий до 100 кэВ подтверждает целесообразность применения предложенного усовершенствованного метода восстановления спектра.

На основании проведенных исследований метрологических характеристик разработанной методики была выполнена оценка суммарной неопределенности результатов измерений МПД в воде. Основные составляющие бюджета неопределенности приведены в таблице 7.

Таблица 7. Составляющие неопределенности измерений МПД в воде

Составляющие неопределенности	$u_{0A}, \%$	$u_{0B}, \%$
Отношение массовых коэффициентов поглощения энергии, $(\mu_{en}/\rho)_B/(\mu_{en}/\rho)_G$		0,1 ¹ 1,5 ¹
Поправка на замещение воды графитом ($p_{B,G}$)		0,1
Определение отношения ионизационных токов	0,05	0,05
Определение ПД в графите	0,4	0,35
Суммарная неопределенность		0,6 ¹ 1,6 ²
Расширенная неопределенность ($k = 2$)		1,2 ¹ 3,2 ²
¹ – для источников с энергиями фотонов более 100 кэВ ² – для источников с энергиями фотонов менее 100 кэВ		

Таким образом доказано положение о том, что разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении массовых коэффициентов поглощения энергии, уточненных для брахитерапевтических условий, обеспечивает воспроизведение поглощенной дозы излучения при брахитерапии в графите с НСП не более 0,9 %, СКО не более 0,4 % и определение значения поглощенной дозы в воде с расширенной неопределенностью не более 3,2 % ($k = 2$).

В пятой главе описывается разработка методов и средств воспроизведения единиц флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц.

Анализ существующих методов определения флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) выявил ряд ограничений: метод, основанный на применении ионизационных камер требует расчетного учета рекомбинации в зависимости от ЛПЭ; мониторы SEETRAM, основанные на регистрации δ -электронов, выбиваемых пучком из тонкой алюминиевой фольги и алмазные детекторы нестабильны из-за радиационных эффектов и нуждаются в индивидуальной внешней калибровке под каждый тип и энергию частиц; трековые детекторы не обеспечивают измерений в реальном времени и подвержены насыщению при флюенсе более 10^7 см^{-2} . С учетом этих факторов предложена и реализована разработка эталонного комплекса измерителей на основе цилиндров Фарадея (ЦФ) с набором коллиматоров. Метод основан на прямом сборе заряда ТЗЧ с помощью ЦФ, что обеспечивает метрологическую прослеживаемость результатов к государственному эталону заряда. При полном поглощении частиц и подавлении вторичной эмиссии отклик детектора определяется только суммарным зарядом, что устраняет зависимость от типа или энергии ионов и исключает эффекты рекомбинации. Коллиматор с известной площадью отверстия позволяет определять плотность потока ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Характеристики конструируемых цилиндров Фарадея (ЦФ) проектировались с учетом параметров пучка (энергии, средней интенсивности, геометрических размеров) и необходимости минимизации наведенной радиоактивности материалов.

Существенным источником неопределенности при измерении заряда является поток электронов, выбиваемых пучком ТЗЧ из входного окна (металлической фольги) и проникающих внутрь стакана ЦФ. Для оценки влияния этого фактора выполнено компьютерное моделирование траекторий электронов с энергиями от единиц эВ до десятков кэВ с учетом геометрии передней части ЦФ и распределения электрического поля. Для минимизации влияния этого эффекта разработано охранный кольцо в виде концентрического электрода, размеры которого выбраны по результатам моделирования для полного перекрытия траекторий вторичных электронов. Подавление потока вторичных электронов обеспечивается подачей на кольцо отрицательного смещающего потенциала. Расчеты подтвердили, что значение смещения -300 В (с возможностью регулировки в диапазоне от 0 до -500 В для различных типов ионов и для разных энергий) перехватывает электроны с энергиями до 5 кэВ, не искажая траекторию высокоэнергетических ТЗЧ. Для подавления высокоэнергетических δ -электронов в конструкции были предусмотрены постоянные магниты, создающие на входе локальное магнитное поле индукцией $0,3\text{--}0,4$ Тл, которое закручивает траектории частиц и снижает вероятность достижения ими стакана. При определении флюенса и плотности потока ТЗЧ необходимо знание точного значения площади пучка. Реализованные в конструкции сменные коллиматоры различных диаметров позволяют получать известные площади пучка (рисунок 12).

Второй задачей является обеспечение полного поглощения ТЗЧ в материале стакана ЦФ для исключения потерь измеряемого заряда пучка в результате сквозного пролета ТЗЧ или вылета фрагментов ядерных взаимодействий. Минимальные значения толщин стаканов определена исходя из максимальных энергий и пробегов частиц, применяемых при испытаниях ЭКБ на радиационную стойкость: протонов ($30\text{--}1000$ МэВ, интенсивность $10^7\text{--}10^{10}$ с^{-1}), ионов углерода ($30\text{--}430$ МэВ/нуклон) и тяжелых ионов Ne, Ar, Kr, Xe ($2\text{--}10$ МэВ/нуклон). Расчет пробегов и распределения выделяемой энергии выполнялся в программах SRIM/TRIM и GEANT4 (рисунок 12).

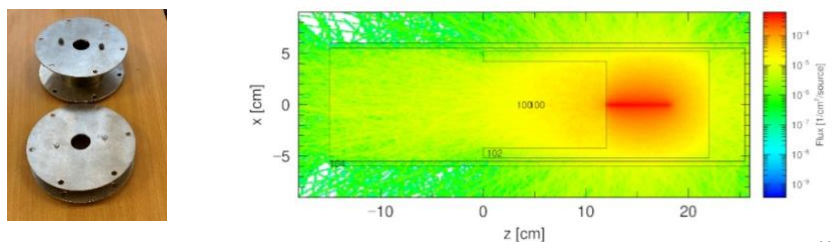


Рисунок 12 – Сменные коллиматоры различных диаметров, расчет траекторий пробегов ТЗЧ в ЦФ

Из-за высоких удельных ионизационных потерь пробеги тяжелых ионов существенно меньше, чем у протонов равной энергии на нуклон (например, в меди пробег ^{12}C при 8 МэВ/нуклон составляет 53 мкм, ^{84}Kr при 2,8 МэВ/нуклон – 25,8 мкм, ^{132}Xe при 2,7 МэВ/нуклон – 19,6 мкм).

Тепловой расчет стакана на основе распределения потерь энергии dE/dx проводился в пакете ANSYS. Расчетная температура медного стакана для пучка ^{12}C (8 МэВ/нуклон, 20 мкА) составляет 100–130 °С, а для Ar, Kr, Xe разогрев не превышает десятков градусов. Определяющим для проектирования конструкций ЦФ являлся интенсивный протонный пучок.

Основным материалом стакана и охрannого кольца выбрана медь, обладающая высокой теплопроводностью и устойчивостью к радиационной эрозии под воздействием тяжелых ионов. Изоляторы выполнены из керамики. При проведении исследований также учитывалась необходимость обеспечения радиационной безопасности из-за возникновения вторичного излучения (нейтронов и гамма-квантов) при ядерных реакциях. Сборочный чертеж, общий вид и внутренние элементы ЦФ представлены на рисунке 13.



Рисунок 13 – Сборочный чертеж, общий вид и внутренние элементы ЦФ

Воспроизведение флюенса и плотности потока ТЗЧ с помощью цилиндра Фарадея основано на измерении электрического заряда, перенесенного определенным числом частиц. Зная электрический заряд одной частицы (произведение элементарного заряда e на средний эффективный заряд иона $q_{\text{эфф}}$) и измерив полный заряд Q , собранный за время облучения, можно вычислить общее число частиц $N = Q/(q_{\text{эфф}} \cdot e)$.

Флюенс частиц Φ определяется через отношение числа частиц dN , проникающих в элементарную сферу, к площади ее центрального сечения dS : $\Phi = dN/dS$. В частном случае плоскопараллельного и мононаправленного пучка, падающего перпендикулярно на известную площадь S , флюенс определяется как:

$$\Phi = \frac{N}{S} = \frac{Q}{e \cdot q_{\text{эфф}} \cdot S} \quad (11)$$

а плотность потока выражается как:

$$\varphi = \frac{dN/dt}{S} = \frac{dQ/dt}{e \cdot q_{\text{эфф}} \cdot S} \quad (12)$$

При разработке метода воспроизведения флюенса и плотности потока был подробно проанализирован ряд основных эффектов, вносящих вклад в неопределенность результата: потери части пучка во входном окне или стенках, утечки заряда, эмиссия вторичных электронов и др. Кроме того, точность измерения определяется характеристиками используемых измерительных приборов. В данном случае был использован электрометр Keysight B2987A, внесенный в государственный реестр средств измерений утвержденного типа. На практике в формулы (11) и (12) вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие отклонения от идеальной модели (потери частиц, вторичные эффекты).

При воспроизведении флюенса и плотности потока ТЗЧ с применением ЦФ (были разработаны две модификации первичного преобразователя: малый и большой ЦФ для частиц разного диапазона энергий и пробегов) основными источниками неопределенности являются следующие факторы.

Измерение заряда Q вносит основной вклад в неопределенность флюенса и зависит от точности и стабильности электрометра и повторяемости измерений; статистическая составляющая (тип А) оценена в 0,70 %, а систематическая (тип В) – в 0,69 %. Измерение тока I вносит превалирующий вклад в неопределенность плотности потока, где составляющая по типу А оценивается в 0,80 %, а по типу В – 0,75 %. Поправка на влияние входного окна учитывает долю поглощенных в фольге частиц, которая по результатам моделирования Монте-Карло составляет менее 0,1 %, а неопределенность этой поправки (тип В) оценена в 0,06 % из-за неточности знания толщины, состава окна, энергии пучка и погрешности расчетной модели. Поправка на вторичную электронную эмиссию учитывает унос отрицательного заряда электронами, выбитыми пучком ТЗЧ из входного окна и дна коллектора; по данным моделирования в GEANT4 и экспериментальной проверки (путем измерения тока при включенном и отключённом смещающем напряжении охранного кольца), потери заряда не превышают 1 %, а поправочный коэффициент близок к единице с неопределенностью, оцененной в 0,29 % (тип В). Утечка тока по изоляторам обусловлена паразитными токами через диэлектрические элементы; ее влияние минимизировано размещением системы в вакууме и вычитанием постоянной компоненты темнового тока, а неопределенность от колебаний утечки во времени (тип В) оценена в 0,23 %. Поправка на компаратор учитывает потери пучка (не более 0,1 %) на рассеяние и поглощение в мониторирующем устройстве при воспроизведении и передаче единицы величины; поправочный коэффициент экспериментально определен (путем сравнения токов на ЦФ с установленным и убраным из пучка компаратором) и оценен равным 0,999 с неопределенностью 0,20 % (тип В). Вклад в неопределённость флюенса/потока от неточного знания S оценивается как 0,29 % (тип В).

Результаты исследований метрологических характеристик разработанных ЦФ приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Источники неопределенностей при воспроизведении флюенса ТЗЧ

Источники неопределенности результатов измерения	$u_{OA}, \%$	$u_{OB}, \%$
Q – измерение заряда в цилиндре Фарадея (ЦФ)	0,7	0,69
Ослабление потока частиц входным окном ЦФ		0,06
Вклад в показания ЦФ за счет вторичных электронов из входного окна и дна ЦФ		0,29
Ток утечки ЦФ		0,23
Ослабление потока частиц компаратором		0,12
S – площадь пучка		0,29
Суммарная стандартная неопределенность	1,10	
Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $k = 2$	2,20	

Таблица 9 – Источники неопределенностей при воспроизведении плотности потока ТЗЧ

Источники неопределенности результатов измерения	$u_{OA}, \%$	$u_{OB}, \%$
I – измерение тока в цилиндре Фарадея	0,8	0,75
Ослабление потока частиц входным окном ЦФ		0,06
Вклад в показания ЦФ за счет вторичных электронов из входного окна и дна ЦФ		0,29
Ток утечки ЦФ		0,23
Ослабление потока частиц компаратором		0,12
S – площадь пучка		0,29
Суммарная стандартная неопределенность	1,20	
Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $k = 2$	2,40	

Разработанные первичные преобразователи были включены в комплекс эталонной аппаратуры для измерения параметров пучков протонов и тяжелых заряженных частиц для целей лучевой терапии и испытаний на стойкость к воздействию ТЗЧ при выполнении ОКР «Система-2020» по заданию Росстандарта (Государственный контракт № 120-86/2020 на выполнение опытно-конструкторских работ по совершенствованию системы государственных первичных эталонов и системы обеспечения единства измерений в целом).

Помимо цилиндров Фарадея с коллиматорами, вошедших в состав государственного первичного эталона, в рамках созданного единого аппаратного комплекса были разработаны и исследованы сопутствующие средства измерений:

1. Ионизационная камера для различных дозиметрических задач в пучках протонов;
2. Многослойные цилиндры Фарадея для разных типов частиц, обеспечивающие оперативные измерения для получения кривых Брэгга;
3. Водные фантомы, позволяющие производить измерения пространственных дозовых распределений по глубине воды.

Таким образом, доказано положение о том, что разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении методов моделирования для определения оптимальных параметров первичных преобразователей и поправочных коэффициентов, обеспечивает воспроизведение флюенса и плотности потока частиц ТЗЧ с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ($k = 2$).

В шестой главе описывается разработка методов и средств воспроизведения единицы энергии тяжелых заряженных частиц.

По результатам анализа существующих подходов к определению энергии ТЗЧ установлено, что целесообразным решением, способным составить основу государственного первичного эталона, является подход, базирующийся на совместном применении калориметра полного поглощения для определения полной энергии пучка и цилиндра Фарадея для определения количества частиц в сеансе облучения. В отличие от косвенных методов, данный подход позволяет определять энергию частиц через тепло, выделяемое в поглотителе калориметра, а число частиц N – через суммарный электрический заряд, зарегистрированный цилиндром Фарадея, тем самым напрямую связывая результаты измерений с базовыми единицами.

При реализации данного подхода кинетическая энергия отдельной частицы E определяется по формуле:

$$E = \frac{C \cdot \Delta T}{N} = \frac{I \cdot U_T \cdot t}{N} \cdot \frac{\Delta U_{\text{рад}}}{\Delta U_{\text{эл}}} \cdot \prod_i k_i \quad (13)$$

где $C \cdot \Delta T = I \cdot U_T \cdot t \cdot \frac{\Delta U_{\text{рад}}}{\Delta U_{\text{эл}}} \cdot \prod_i k_i$ – составляющая определения полной поглощенной энергии излучения (аналогичная подходу для поглощенной дозы, но без деления на массу поглотителя), N – количество частиц за время измерений; $\prod_i k_i$ – произведение поправочных коэффициентов.

При выборе материала поглотителя калориметров полного поглощения в основу был положен ряд критериев: материал поглотителя должен обеспечивать полное поглощение пучка частиц при меньшей толщине (L , см), минимальное значение времени выравнивания температуры (τ , с), высокий относительный прирост температуры при поглощении одной и той же энергии в одинаковом объеме по сравнению с другими материалами ($\Delta T/\text{Дж}$ (отн.)).

Сравнительный анализ параметров различных сред (медь, алюминий, графит, свинец, вольфрам, нержавеющая сталь, вода, ПММА пластик) показал преимущество меди при условии приоритета минимизации размера поглотителя для протонов с энергиями до 250 МэВ. Медь обладает высокой теплопроводностью (400 Вт/(м·К)), что минимизирует тепловой градиент. Толщина поглотителя установлена равной 7 см, что гарантирует полное торможение пучка. Конструктивно блок выполнен в форме усеченного конуса, поперечный

размер которого полностью перекрывает геометрическое сечение пучка с учетом радиального рассеяния частиц в металле (рисунок 14).



Рисунок 14 – Медный поглотитель и общий вид калориметра полного поглощения

Для тяжелых ионов с малыми пробегами (ионы Ar, Kr, Xe с энергией 3-5 МэВ/нуклон) был спроектирован комбинированный поглотитель: ввиду малого пробега частиц для обеспечения достаточного теплового отклика при минимальной массе разработана двухслойная конструкция. В качестве фронтального слоя с высокой тормозной способностью использована свинцовая фольга ($Z = 82$, $\rho = 11,3 \text{ г/см}^3$, 100 мкм). С тыльной стороны к ней присоединена фольга из молибдена ($Z = 42$, $\rho = 10,2 \text{ г/см}^3$), выполняющая функцию подложки для обеспечения механической жесткости и быстрого распределения тепла по площади с целью выравнивания локальной температуры. Конструкция держателя поглотителей и общий вид калориметра полного поглощения для тяжелых ионов представлены на рисунке 15.



Рисунок 15 – Конструкция держателя поглотителей и общий вид калориметра полного поглощения для тяжелых ионов

При помощи программных пакетов Geant4 и PHITS рассчитаны пространственные параметры распределения поглощенной энергии. Для медного поглотителя толщиной 7 см подтверждено полное поглощение протонного пучка с энергиями до 250 МэВ и для ионов ^{12}C до энергий 430 МэВ/нуклон. Потери энергии за счет вторичных нейтронов и гамма-квантов ядерных реакций учтены в виде расчетной поправки.

Моделирование тепловых процессов методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics позволило оценить динамику распределения температуры при локализованном выделении энергии (рисунок 16). Расчёты показали, что за время измерения тепло успевает распространиться по всему объёму выбранных конструкций поглотителей, и разницей температур между центром и краем объема можно пренебречь.

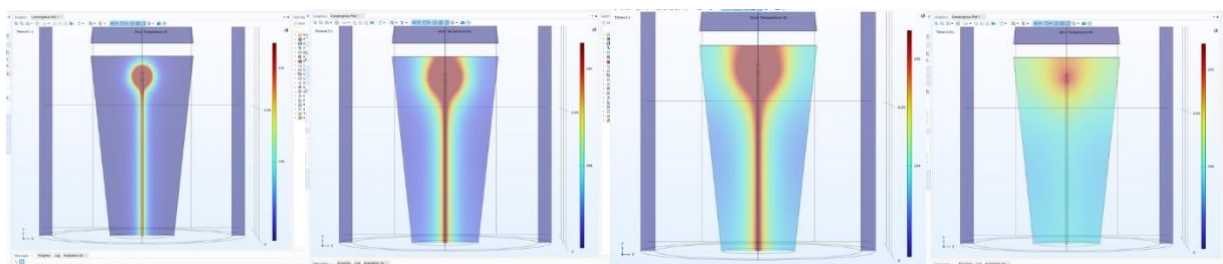


Рисунок 16 – Моделирование тепловых процессов в медном поглотителе

Созданные опытные образцы калориметров прошли серию экспериментальных проверок на ускорительных комплексах. Медный калориметр испытывался на пучках протонов терапевтических энергий медицинского протонного ускорителя и исследовательского протонного циклотрона, а также опробован на пучке ионов углерода.

Отдельный цикл исследований высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов выполнен в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) на циклотроне У-400-Н, обеспечивающем вывод широкого спектра частиц (от протонов до висмута $^{209}\text{Bi}^{83+}$). Испытания калориметра для частиц с малыми пробегами (на основе тонкого свинцово-молибденового поглотителя) проводились в вакуумной камере вывода ускорителя в пучках ионов Ar, Kr и Xe с энергиями от 3 до 5 МэВ/нуклон в условиях, имитирующих испытания ЭКБ на радиационную стойкость. В ходе экспериментов равномерность интенсивности пучка контролировалась сцинтилляционными датчиками и токовым измерителем плотности потока, а номинальная энергия верифицировалась с помощью времяпролетных датчиков с время-цифровыми преобразователями. Эксперименты подтвердили долговременную стабильность теплового отклика и адекватность разработанных конструктивных решений.

Для калориметров полного поглощения проведена оценка составляющих неопределенности воспроизведения энергии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Энергия, унесенная вторичными частицами за пределы поглотителя в результате неупругих ядерных реакций, не переходит в тепло и приводит к систематическому занижению показаний калориметра. Расчетные оценки в коде Geant4 показали, что доля теряемой энергии для углеродных пучков терапевтических энергий составляет до 1,0 % (при максимальной глубине пика Брэгга), а для протонных пучков в интервале энергий 60–200 МэВ варьируется в пределах 0,3–0,7% (при выбранной толщине поглотителя – не более 0,5 %).

Для внесения поправки на этот эффект и оценки связанной неопределенности проведено специальное моделирование с полной регистрацией всех выходящих частиц, а также выполнены экспериментальные измерения с применением средств измерений, входящих в состав государственного первичного эталона ГЭТ 117-2023. Неопределенность

коэффициента $k_{\text{яв}}$, учитывающего долю энергии, покидающей поглотитель в результате ядерных взаимодействий, оценена в 0,17 % (тип В), что подтверждает надежность используемых физических моделей (Binary Cascade и Quantum Molecular Dynamics). Поправка на градиент распределения энергии по глубине поглотителя $k_{\text{гр}}$ отличалась от 1 менее чем на 0,1 % с неопределенностью 0,06 % (тип В). Бюджет неопределенности калориметрического воспроизведения единицы энергии ТЗЧ приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Бюджет неопределенности воспроизведения единицы энергии ТЗЧ калориметром полного поглощения

Источники погрешности	Погрешность		Неопределенность	
	$S_0 \cdot 10^2$	$\theta \cdot 10^2$	u_{0A}	u_{0B}
$N_{\text{эг}}$ чувствительность калориметра, определяемая путем электрической калибровки		0,15		0,09
$\Delta U_{\text{рад}}$ изменение напряжения в мостовой схеме при облучении ионизирующим излучением	0,4	0,05	0,4	0,03
$k_{\text{тп}}$ потери тепла от поглотителя по подводящим проводам		0,20		0,1
$k_{\text{гр}}$ градиент мощности поглощенной дозы в радиальном и аксиальном направлении в поглотителе.		0,10		0,06
$k_{\text{тд}}$ «тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра.		0,30		0,17
$k_{\text{яв}}$ доля энергии, покидающей поглотитель в результате ядерных взаимодействий частиц с материалом поглотителя		0,30		0,17
N – количество частиц	0,7	1,38	0,7	0,8
Суммарные значения	0,8	2,1		
Суммарная стандартная неопределенность			1,16	
Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $k = 2$			2,32	

Разработанные конструкции калориметров полного поглощения совместно с методами определения поправочных коэффициентов внедрены в Государственный первичный эталон, что позволяет обеспечить прослеживаемость результатов измерений для целей контроля параметров ускорительных комплексов лучевой терапии и стендов испытаний ЭКБ на воздействие тяжелых ионов.

Таким образом, доказано положение о том, что разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении методов моделирования для определения оптимальных параметров первичных преобразователей и поправочных коэффициентов, обеспечивает воспроизведение энергии ТЗЧ с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ($k = 2$).

В седьмой главе описывается разработка методов и средств определения соотношений энергия-пробег тяжелых заряженных частиц.

Соотношение энергия–пробег на ускорителях важно для протонно-ионной терапии, где необходимо точно знать пробег частиц для эффективного поражения опухоли, и при испытаниях ЭКБ – чтобы корректно моделировать воздействие космических частиц на микроэлектронику.

Анализ методов определения пробега ТЗЧ показывает, что из-за ряда неопределенностей справочных данных целесообразно использовать экспериментальные методы определения параметров ускорителей. Для измерения энергии автором предложено совместное применение калориметрии полного поглощения и цилиндра Фарадея (подробно описано в главе 6). Для определения пробегов частиц предложена реализация метода, при котором за пробег пучка принимается глубина материала, на которой значения флюенса частиц составляет 50 % от начального значения за вычетом части флюенса частиц, выбывших в результате ядерных реакций.

В работе предложен и реализован аппаратно-методический комплекс, включающий ЦФ для определения флюенса частиц (1), устройства поглотителей с переменной толщиной (2), и калориметр полного поглощения (в совокупности с ЦФ) для измерения энергии частиц (3) (рисунок 17).

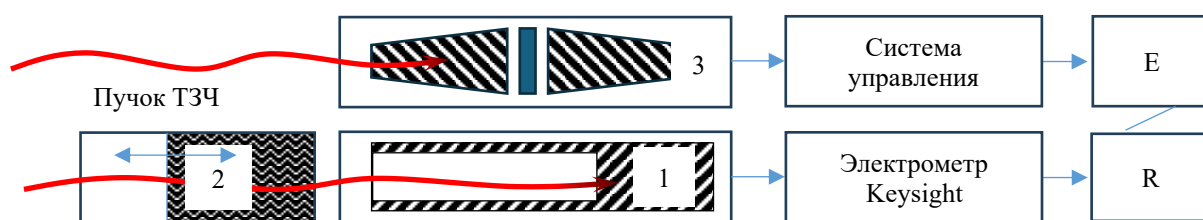


Рисунок 17 – Аппаратно-методический комплекс для определения соотношений энергия/пробег ТЗЧ.

Для определения пробегов протонов разработана конструкция поглотителя на основе слоя воды регулируемой толщины. Выбор жидкой водной среды обусловлен возможностью плавного изменения толщины поглощающего слоя, теплофизическими свойствами, предотвращающими локальный перегрев конструкции, а также низкой радиационной опасностью из-за короткого периода полураспада образующихся нуклидов ^{15}O и ^{11}C , что исключает накопление долговременной наведенной активности.

Конструктивно водяной поглотитель представляет собой герметичную емкость из нержавеющей стали (рисунок 18). Входное и выходное окна выполнены из оргстекла для минимизации искажений пучка на границах раздела сред. Регулировка толщины слоя воды осуществляется механическим перемещением одной из стенок. Шаг изменения толщины составляет 0,05 мм. Максимальные габариты емкости рассчитаны на толщину водяного слоя 300 мм, что перекрывает диапазон пробегов протонов с энергией 200 МэВ. Для работы в области более высоких энергий перед регулируемой емкостью дополнительно размещаются стационарные блоки из «твердой воды».

Для тяжелых заряженных частиц с энергиями до десятков МэВ/нуклон (O, Ar, Kr, Ne, Xe), обладающих пробегами от единиц миллиметров до десятков микрометров, с учетом того, что вывод таких пучков, преимущественно, происходит в вакуумных камерах, применение водных поглотителей технически нецелесообразно. Для решения этой задачи разработано устройство дискретной смены поглотителей, состоящее из двух последовательно расположенных вращающихся дисков с держателями фильтров (рисунок 18). Каждый диск оснащен набором окон с фильтрами различной толщины (диаметр рабочей области 45 мм обеспечивает полное перекрытие пучка). Общая толщина поглотителя формируется суммой толщин фольг двух дисков. Система обеспечивает 36 уникальных комбинаций, перекрывающих диапазон от 0 до $1,2 \cdot R_{\text{CSDA}}$ (R_{CSDA} – расчётные пробеги, определенные в приближении непрерывного замедления) с максимальной плотностью экспериментальных точек в области половинного флюенса пучка ($R_{1/2}$), что необходимо для построения кривых зависимости флюенса частиц от толщины поглотителя.

Для легких ионов (^{16}O , ^{20}Ne) обосновано использование полимерных пленок (каптон, лавсан) за счет их низкой плотности и механической прочности при толщинах до 150 мкм. Для среднетяжелых и тяжелых ионов применены металлические фильтры из алюминия (для ^{40}Ar) и меди (для ^{84}Kr , ^{132}Xe , ^{209}Bi).



Рисунок 18 – Устройства поглотителей переменной толщины

Толщины используемых фильтров подтверждалась путем взвешивания вырубленных образцов на аналитических весах с ценой деления 0,01 мг после предварительной сушки в вакууме. Управление выбором 36 уникальных комбинаций толщин дисков осуществляется дистанционно программным обеспечением без разгерметизации вакуумной камеры ускорителя.

При определении пробега пучок частиц проходит через поглотитель переменной толщины и поглощается в цилиндре Фарадея, соединенном с вакуумной системой, поддерживающей остаточное давление $(6,0 \pm 0,5)$ Па для исключения ионизации воздуха. Регистрация токов выполнялась электрометром Keysight B2987A в импульсном режиме.

Экспериментальная проверка калориметра полного поглощения и устройства поглотителей переменной толщины осуществлена в ходе испытаний на пучках протонных и ионных ускорителей. Эксперименты с медным калориметром и водным поглотителем переменной толщины проводилось на протонном ускорительном комплексе «Прометеус» в диапазоне энергий, применяемых в лучевой терапии (рисунок 19). Эксперименты проходили при интенсивности 10^9 протонов за цикл.

Исследования в полях короткопробежных тяжелых заряженных частиц выполнены на циклотронном комплексе У-400-Н в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований на пучках ионов аргона, криптона и ксенона с удельными энергиями от 3 до 5 МэВ/нуклон (рисунок 19). Равномерность интенсивности контролировалась сцинтилляционными датчиками и токовым измерителем плотности потока частиц, а номинальная энергия пучка верифицировалась времяпролетными датчиками, подключенными к время-цифровым преобразователям. В ходе экспериментов подтверждено соответствие габаритных параметров измерительных комплексов внутренним размерам вакуумных камер вывода ускорителя при имитации условий тестирования микроэлектроники на эффекты одиночных сбоев.

Выявлено систематическое расхождение между экспериментальными данными и расчетами программ SRIM, ATIMA, PSTAR, превышающее 1 мм (относительное отклонение 3–6 %). Расчетные кривые лежат ниже экспериментальных, что указывает на завышение тормозных способностей в алгоритмах кодов из-за неточного выбора потенциалов ионизации и игнорирования эффектов перезарядки ионов на промежуточных энергиях.



Рисунок 19 – Экспериментальная проверка калориметров полного поглощения и устройств поглотителей переменной толщины

Полученные в результате измерений зависимости тока с цилиндра Фарадея от толщины поглотителя для различных энергий протонов были аппроксимированы (рисунок 20).

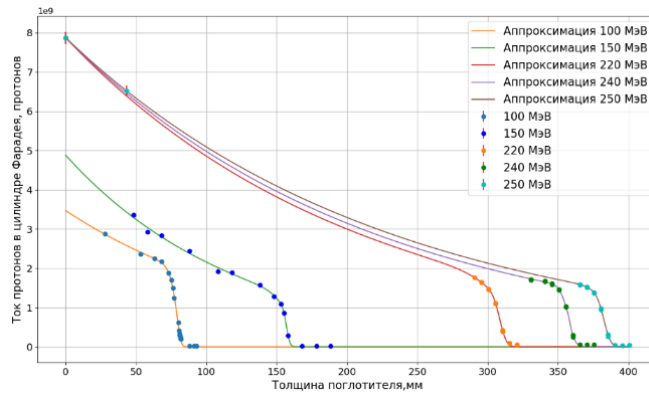


Рисунок 20 – Зависимость тока с цилиндра Фарадея от толщины поглотителя для различных энергий протонов и их аппроксимация

Для математической обработки дискретных экспериментальных точек и определения координаты $R_{1/2}$ с учетом физических процессов в поглотителе использована оригинальная аппроксимирующая функция вида:

$$f(x) = \frac{F}{2} \cdot \int_{\frac{x-\mu}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{st}}}^{+\infty} \exp(-t^2) dt \cdot \exp\left(-\frac{x}{\Delta L}\right) \frac{1}{1 + \exp(k(x-\mu)^m)} \quad (14)$$

где F – ток протонов, регистрируемый цилиндром Фарадея при отсутствии поглотителя (отн. ед.), μ – пробег протонов в воде, мм, σ_{st} – среднеквадратичное отклонение, характеризующее страгглинг пробега, мм, $\frac{1}{1 + \exp(k(x-\mu)^m)}$ – функция, учитывающая многократное рассеяние протонов в материалах поглотителя (где k и m – параметры гладкости модельной функции), $\exp\left(-\frac{x}{\Delta L}\right)$ – функция, учитывающая потери на ядерные реакции (изменение флюенса частиц при изменении толщины поглотителя без учета упругого рассеяние, ΔL – длина свободного пробега частиц в материале).

Коэффициент детерминации аппроксимации экспериментальных данных расчетной моделью (14) составил $R^2 = 0,99996$.

В случае применения водного поглотителя для корректного учета вклада промежуточных слоев, находящихся на пути пучка до его полной остановки (воздушных зазоров, окон из оргстекла емкости и титанового входного окна ЦФ), выполнен расчет их водно-эквивалентной толщины ($R_{эkv}$) по интегральной процедуре через соотношение удельных тормозных способностей сред:

$$R_{эkv} = d \cdot \frac{\rho_{\text{мат}}}{\rho_{\text{вод}}} \cdot \frac{S_{\text{мат}}(E_{\text{ср}})}{S_{\text{вод}}(E_{\text{ср}})} \quad (15)$$

где $E_{\text{ср}}$ – средняя энергия протона в слое материала;

Итоговый бюджет неопределенности метода определения соотношений «энергия – пробег» ТЗЧ и флюенса пучка приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Источники неопределенности метода определения пробегов ТЗЧ и параметров флюенса

Источники неопределенности	$u_{0A}, \%$	$u_{0B}, \%$
Q – измерение заряда в цилиндре Фарадея (ЦФ)	0,7	0,69
Ослабление потока частиц входным окном ЦФ		0,06
Вклад в показания ЦФ за счет вторичных электронов из входного окна и дна ЦФ		0,29
Ток утечки ЦФ		0,23
Ослабление потока частиц компаратором		0,12
S – измерение площади пучка		0,29
Определение толщины поглотителя		0,4
Аппроксимация положения точки 50%-го спада флюенса	0,12	
Суммарная стандартная неопределенность	1,18	
Расширенная неопределенность ($k = 2$)	2,35	

Таким образом доказано положение о том, что совместное применение разработанных калориметров полного поглощения и цилиндров Фарадея с устройствами поглотителей переменной толщины, обеспечивает определение значений пробегов протонов и ТЗЧ с расширенной неопределенностью не более 2,4 %, определение экспериментального соотношения энергий и пробегов с расширенной неопределенностью не более 5 %.

Закключение. Выполненное исследование охватывает полный цикл разработки первичных эталонных средств измерений для поглощённой дозы низкоэнергетического фотонного, протонного и ионного излучения, энергии, флюенса и плотности потока тяжёлых заряженных частиц. По каждой группе излучений реализован оптимальный метод высокоточных измерений, что позволило решить все поставленные в диссертации задачи в единой метрологической системе.

В процессе исследований были получены следующие научные результаты.

Определены оптимальные параметры конструкций адиабатических калориметров и калориметров полного поглощения, цилиндров Фарадея и ионизационных камер и значения поправочных коэффициентов, учитывающих влияние этих эффектов.

Получен набор экспериментальных данных соответствия пробегов частиц и энергий для различных типов частиц и материалов, применяемых при лучевой терапии и при испытаниях ЭКБ.

Проведены исследования и оценка составляющих бюджета неопределенности измерений энергии, флюенса и плотности потока ТЗЧ.

Предложена, обоснована и реализована структура усовершенствованного ГЭТ 38, обеспечивающего воспроизведение, хранение и передачу единиц поглощенной дозы, энергии, флюенса и плотности потока ТЗЧ.

Обеспечено воспроизведение поглощенной дозы рентгеновского, протонного и ионного излучений, единиц энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц.

Обеспечено подтверждение точности воспроизведения единицы на уровне международных ключевых сличений.

Реализованы методы, позволяющие осуществлять передачу единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы в воде клиническим дозиметрам для рентгеновского, протонного, ионного излучений и излучения при брахитерапии с необходимой для качественного лечения пациентов точностью.

Проведено 3 совершенствования Государственного первичного эталона ГЭТ 38: в 2011, 2021 и 2024 гг.

Последовательно разработаны и внедрены Государственные поверочные схемы:

- с расширением в область низкоэнергетического фотонного излучения
- с добавлением в номенклатуру единиц поглощенной дозы протонного и ионного излучений
- с добавлением в номенклатуру единиц количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц.

Действующая поверочная схема приведена на рисунке 21. Красными линиями отмечены добавленные или обновленные в результате работы ветви.

Результаты работы позволили устранить противоречие между современными требованиями к точности и прослеживаемости измерений целого ряда параметров ионизирующих излучений и состоянием отечественной эталонной базы: сформирована единая, прослеживаемая к государственному первичному эталону цепочка передачи размеров единиц от первичного эталона до рабочих средств измерений для комплекса величин, критичных для лучевой терапии, радиобиологии, радиационных технологий и испытаний электронной компонентной базы.

Впервые в России создана, нормативно закреплена и внедрена целостная система обеспечения единства измерений поглощённой дозы рентгеновского, протонного и ионного излучений, а также параметров пучков тяжёлых заряженных частиц – энергии, флюенса и плотности потока.

Таким образом, поставленная в диссертации научная проблема решена: обеспечена национальная система метрологической прослеживаемости для указанных величин, соответствующая современным научно-технологическим задачам Российской Федерации и международным требованиям к точности и единству измерений.

Достигнутые результаты создают основу для повышения качества и безопасности работ и ускоряют технологический прогресс в научной, медицинской, оборонной и космической отраслях, укрепляя метрологию ионизирующих излучений в Российской Федерации.

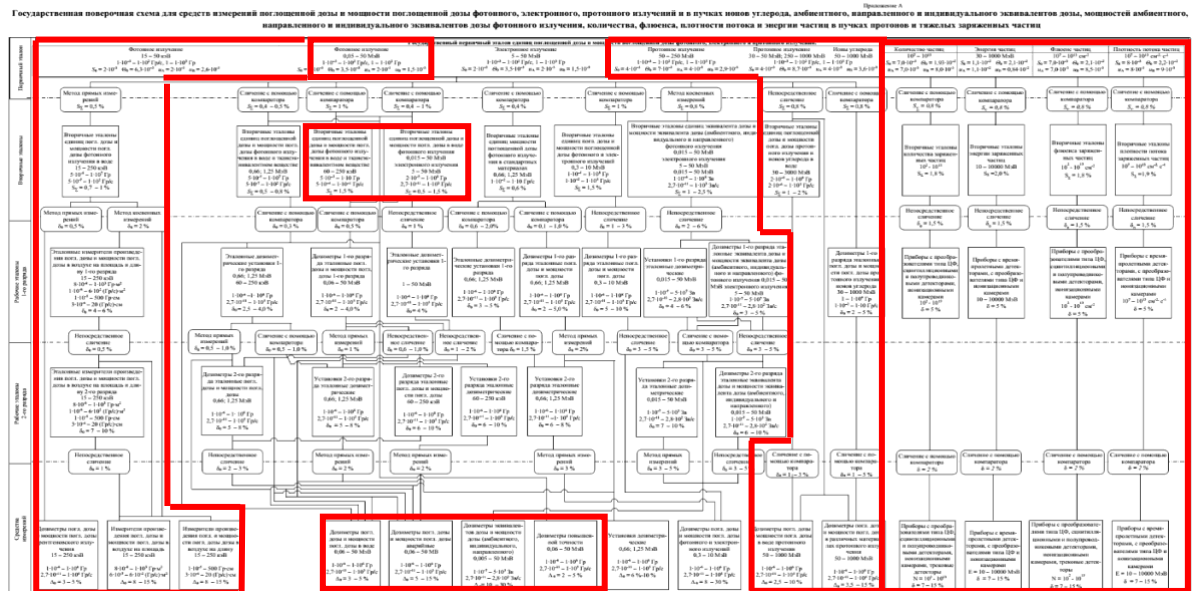


Рисунок 21 – Действующая поверочная схема

По основным положениям диссертационной работы опубликованы 15 научных работ, из них: 13 в изданиях, включенных в перечень рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК (из них 4 – К1, 7 – К2, 1 – К3), кроме того 7 – в изданиях, индексируемых в международной библиографической базе Scopus, 6 – в изданиях, индексируемых в базе Web of Science. Получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

1. Берлянд А.В. Разработка и исследование метрологических характеристик концентрического графитового калориметра для воспроизведения поглощенной дозы от брахитерапевтических источников // АНРИ. 2026. № 3 (126). С. 47-56. Перечень ВАК К2
2. Берлянд А.В. Разработка методов и средств определения мощности поглощенной дозы в воде от брахитерапевтических источников с учетом реальных спектров излучения // АНРИ. 2026. № 3 (126). С. 57-63. Перечень ВАК К2
3. Берлянд А.В., Берлянд В.А., Титаренко Ю.Е., Павлов К.В., Батяев В.Ф. Расчеты методом Монте-Карло поправочных коэффициентов для протонного калориметра // АНРИ. 2025. № 3 (122). С. 29-37. Перечень ВАК К2
4. Берлянд А.В., Берлянд В.А., Кольцов К.А. Экстраполяционная ионизационная камера в твердотельном фантоме для воспроизведения поглощенной дозы низкоэнергетического рентгеновского излучения // АНРИ. 2025. № 1 (120). С. 32-37. Перечень ВАК К2

5. Федоров С.Г., Берлянд А.В., Берлянд В.А., Дьяченко В.М., Коваленко О.И. 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 // Измерительная техника. 2024. Т. 73. № 10. С. 4-12; Web of Science: переводная версия, Scopus: переводная версия, RSCI

Версии: Fedorov S.G., Berlyand A.V., Berlyand V.A., Dyachenko V.M., Kovalenko O.I. GET 117-2023 State primary standard for absorbed dose, absorbed dose rate, ambient and personal dose equivalents, and ambient and personal dose equivalent rates from neutron radiation // Measurement Techniques. 2025. Т. 67. № 10. С. 725-733.

6. Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжёлых заряженных частиц ГЭТ 38-2024 // Измерительная техника. 2024. Т. 73. № 9. С. 12-18. Web of Science: переводная версия, Scopus: переводная версия, RSCI

Версии: Berlyand A.V. GET 38-2024 State primary standard for absorbed dose and absorbed dose rate of photon, electron, and proton radiation and in carbon ion beams and particle quantity, fluence, flux density, and energy in proton and heavy charged particle beams // Measurement Techniques. 2024. Т. 67. № 9. С. 660-667.

7. Федоров С.Г., Берлянд А.В., Дьяченко В.М. Расчет значений мощности амбиентного индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения на основе метода определения спектра // Альманах современной метрологии. 2021. № 3 (27). С. 46-61. Перечень ВАК К2

8. Бутенко А.В., Сыресин Е.М., Тютюнников С.И., Батяев В.Ф., Кулевой Т.В., Павлов К.В., Рогов В.И., Титаренко А.Ю., Титаренко Ю.Е., Берлянд А.В., Берлянд В.А., Соболевский Н.М., Бобровский Д.В., Чумаков А.И., Сабуров В.О., Соловьев А.Н., Пешич М.П. Анализ проблем метрологического обеспечения испытательного стенда для проведения испытаний радиоэлектронных изделий на стойкость к воздействию тяжелых ионов высокой энергии // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2019. Т. 16. № 6 (225). С. 522-534. Web of Science: переводная версия, Scopus: переводная версия, RSCI

Версии: Butenko A.V., Syresin E.M., Tyutyunnikov S.I., Batyaev V.F., Kulevoy T.V., Pavlov K.V., Rogov V.I., Titarenko A.Y., Titarenko Y.E., Berlyand A.V., Berlyand V.A., Sobolevskiy N.M., Bobrovskiy D.V., Chumakov A.I., Saburov V.O., Soloviev A.N., Pesic M.P. Analysis of metrological provision problems of a test stand for testing radio-electronic products

for resistance to irradiation with high-energy heavy ions // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2019. Т. 16. № 6. С. 734-743.

9. А.В. Берлянд, В.А. Берлянд. Методическое обеспечение дозиметрии для целей лучевой терапии // *АЛЬМАНАХ СОВРЕМЕННОЙ МЕТРОЛОГИИ*. 2019. № 3 (19). Перечень ВАК К2

10. Берлянд А.В., Берлянд В.А., Панасенко Р.А., Успенский А.П. Развитие эталона поглощенной дозы фотонного ионизирующего излучения // *Вестник метролога*. 2019. № 4. С. 22-27. Перечень ВАК К3

11. Берлянд А.В., Берлянд В.А. Воспроизведение мощности поглощенной дозы фотонного излучения в графите с помощью графитовой экстраполяционной камеры в графитовом фантоме // *АНРИ*. 2014. № 1 (76). С. 56-59. Перечень ВАК К2

12. Титаренко Ю.Е., Батяев В.Ф., Боровлев С.П., Рогов В.И., Павлов К.В., Титаренко А.Ю., Тихонов Р.С., Феофанов С.А., Юлдашев С.Н., Анашин В.С., Берлянд В.А., Берлянд А.В. Токовый измеритель плотности потока частиц в режиме реального времени // *Приборы и техника эксперимента*. 2013. № 5. С. 132-134. Web of Science: переводная версия, Scopus: переводная версия, RSCI

13. Берлянд А.В., Берлянд В.А., Брегадзе Ю.И. Государственный первичный эталон единиц мощности поглощенной дозы фотонного и электронного излучений, его совершенствование и результаты ключевых сличений // *Измерительная техника*. 2010. № 2. С. 3-8. Web of Science: переводная версия, Scopus: переводная версия, RSCI

Версии: Berlyand A.V., Berlyand V.A., Bregadze Y.I. National primary standard for the units of absorbed dose rate of photon and electron radiation, improvements and results of key comparisons // *Measurement Techniques*. 2010. Т. 53. № 2. С. 115-122.

14. Berlyand V.A., Berlyand A.V., Allisy-Roberts P.J., Kessler C., Burns D.T. Comparison of the standards for absorbed dose to water of the VNIIFTRI, Russia and the BIPM in ^{60}Co γ -rays // *Metrologia*. 2010. Т. 47. № Suppl.. С. 06003. Web of Science, Scopus

15. Fedorov S.G., Berlyand A.V., Dyachenko V.M. Ensuring the unity of measurements of the neutron radiation rate absorbed dose in the field of clinical neutron radiation dosimetry // *Journal of Physics: Conference Series*. III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022). Krasnoyarsk, 2022. С. 22046. Scopus

Свидетельство о регистрации программы

16. Берлянд А.В., Берлянд В.А., Федоров С.Г., Дьяченко В.М. Программа считывания и обработки данных ионизационной камеры Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022664676, 03.08.2022. Заявка № 2022664244 от 28.07.2022.