

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук БОРИСЮКА ПЕТРА
ВИКТОРОВИЧА,

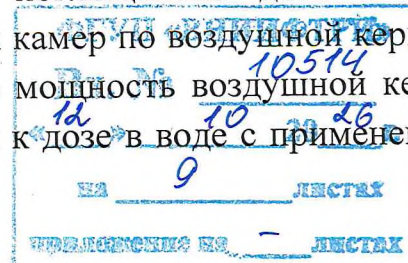
заведующего кафедрой «Физико-технические проблемы метрологии» (№ 78)
Института лазерных и плазменных технологий федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
на диссертационную работу БЕРЛЯНДА АЛЕКСАНДРА
ВЛАДИМИРОВИЧА на тему «Совершенствование системы обеспечения
единства измерений поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного
излучений и энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных
частиц», представленную на соискание ученой степени доктора технических
наук в диссертационный совет 32.1.004.01 при ФГУП «ВНИИФТРИ» по
специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

На отзыв представлены диссертация и автореферат. Диссертация
изложена на 381 странице и состоит из введения, семи глав, заключения,
списка литературы из 282 наименований и шести приложений; работа
содержит 102 рисунка и 33 таблицы. Работа выполнена в ФГУП
«ВНИИФТРИ», научный консультант – доктор физико-математических наук
Ю.Е. Титаренко.

Отзыв подготовлен по результатам анализа текста диссертации,
автореферата и опубликованных работ соискателя. Основное внимание в
отзыве уделено физическим основам предложенных методов
воспроизведения единиц, построению уравнений измерений и
обоснованности оценок неопределенности.

Актуальность темы диссертации

К моменту начала рецензируемой работы отечественная эталонная база
обеспечивала прослеживаемость измерений поглощенной дозы, по существу,
только для излучения радионуклидных установок дистанционной терапии.
Для протонных и ионных пучков применялась косвенная схема:
воспроизведение единицы в поле ^{60}Co с последующим переходом к
интересующему виду излучения через расчетные коэффициенты. Для
рентгеновского излучения низких энергий поглощенная доза в воде
определялась через калибровку ионизационных камер по воздушной керме, а
для брахитерапевтических источников – через мощность воздушной кермы
на расстоянии 1 м с последующим пересчетом к дозе в воде с применением



дозовой постоянной Λ . При таких схемах точность результата ограничена точностью используемых справочных и расчетных данных – средней энергии ионообразования, отношений тормозных способностей, коэффициентов перехода от кермы к поглощенной дозе, дозовой постоянной, – и для ряда видов излучения погрешность достигает 8–10 %. Единицы энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) государственными эталонами не воспроизводились вовсе.

Вместе с тем требования к точности измерений в этих областях являются жесткими: в лучевой терапии погрешность значения поглощенной дозы не должна превышать 3 %, при испытаниях электронной компонентной базы (ЭКБ) на стойкость к воздействию ТЗЧ погрешность определения параметров пучка нормируется на уровне 10 %. Противоречие между этими требованиями и состоянием эталонной базы сформулировано соискателем корректно, и его устранение является задачей первостепенной важности для метрологического обеспечения ядерной медицины, космической отрасли и испытательной инфраструктуры.

Таким образом, тема диссертации А.В. Берлянда **актуальна** как в научном, так и в практическом отношении.

Общая характеристика работы

Работа построена логично. В главе 1 выполнен анализ методов и средств определения поглощенной дозы, энергии, флюенса и пробегов ТЗЧ, на основании которого сделан вывод о необходимости создания верхних звеньев поверочной схемы на основе абсолютных методов, максимально приближенных к определениям соответствующих величин. Главы 2–7 посвящены последовательному решению частных задач для каждой группы величин; итог работы сведен в структуру Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024 и государственной поверочной схемы.

С точки зрения физики измерений в работе реализованы четыре принципиально различных метода воспроизведения единиц.

Ионометрия с экстраполяцией к нулевому зазору (глава 2). Для рентгеновского излучения с энергиями 5–15 кэВ, где калориметрия неприменима из-за малого пробега фотонов, разработана плоскопараллельная экстраполяционная ионизационная камера (ЭИК) в тканеэквивалентном фантоме со сменными входными окнами из графитизированной ПЭТ-пленки толщиной 4 и 10 мкм. Уравнение измерений (10) содержит только величины, определяемые экспериментально либо принимаемые по данным с оцененной неопределенностью: W/e , плотность воздуха, эффективную площадь собирающего электрода и производную тока

по зазору. Методически удачным является определение эффективной площади электрическим методом – по зависимости емкости камеры от расстояния между электродами ($7,163 \text{ см}^2$), а также определение действительного нулевого зазора ($0,096 \text{ мм}$) по экстраполяционным кривым. Переход от дозы в воздухе к дозе в воде выполнен через отношение массовых коэффициентов поглощения энергии, взвешенных по реальному спектру излучения. Для восстановления спектра по аппаратурному спектру CdTe-спектрометра соискатель перешел от последовательного вычитания аппаратурных искажений к восстановлению всего спектра на основе функции отклика детектора, построенной по результатам моделирования и калибровочных измерений, с оценкой неопределенности восстановленного спектра. Это современный и математически корректный подход.

Квазиadiaбатическая калориметрия (главы 3 и 4). Уравнения измерений (13) и (23) представлены в виде произведения чувствительности калориметра, определяемой электрической градуировкой, и набора поправочных коэффициентов, каждый из которых имеет ясную физическую интерпретацию и собственную оценку неопределенности. Поправки получены на основе связанного моделирования: трехмерное распределение поглощенной энергии, рассчитанное методами Монте-Карло (Geant4, FLUKA, PHITS), используется как источник тепловыделения в конечно-элементной модели теплопереноса (COMSOL, ANSYS). Для протонных калориметров геометрия выбрана по результатам расчетов нескольких сотен вариантов конструкции с последующей проверкой устойчивости характеристик к технологическим допускам. Для брахитерапии разработан калориметр концентрического типа с кольцевым поглотителем, в котором решена задача разделения радиационного нагрева и собственного нагрева высокоактивного источника. Выявлена и физически интерпретирована немонотонная зависимость поправки квз от энергии фотонов, связанная с тем, что при снижении энергии фотонов в графите преобладающим процессом вместо комптоновского рассеяния становится фотоэлектрическое поглощение.

Прямой сбор заряда (глава 5). Воспроизведение флюенса и плотности потока ТЗЧ основано на соотношениях (28), (29), связывающих число частиц с зарядом, собранным цилиндром Фарадея. Тем самым единицы флюенса и плотности потока воспроизводятся с прослеживаемостью непосредственно к эталонам электрического заряда и тока. Подавление вторичной электронной эмиссии обеспечено охраным кольцом с регулируемым отрицательным потенциалом (параметры выбраны по результатам расчета траекторий электронов) и постоянными магнитами с индукцией $0,3\text{--}0,4 \text{ Тл}$.

Положительной оценки заслуживает предложенная методика контроля достоверности показаний цилиндра Фарадея двумя независимыми способами – радиационным, с эталонным β -источником, и электрическим, с разрядом эталонного конденсатора.

Калориметрия полного поглощения (главы 6 и 7). Энергия частицы определяется по формуле (30) как отношение энергии, поглощенной калориметром, к числу частиц, определенному цилиндром Фарадея. В этой схеме энергия частицы выражается через электрическую энергию градуировочного нагрева и электрический заряд, т. е. через электрические единицы. Выбор материалов поглотителей выполнен по сформулированным соискателем количественным критериям; для ионов с пробегами в десятки микрометров разработан двухслойный поглотитель «свинец – молибден». Аппаратура проверена на медицинском протонном комплексе «Прометеус», исследовательском протонном циклотроне и на циклотроне У-400-Н Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в пучках ионов Ar, Kr и Xe. В главе 7 на этой основе создан аппаратурно-методический комплекс для экспериментального определения соотношений «энергия – пробег».

Следует отметить, что результаты расчетов в работе проверены с помощью нескольких независимых программ, а расхождение между ними учтено в бюджете неопределенности. Такой подход является методически правильным.

Текст диссертации соответствует требованиям к оформлению, содержит достаточное количество поясняющих рисунков и таблиц.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Каждое из шести положений, выносимых на защиту, содержит количественный показатель точности и подкреплено бюджетом неопределенности, приведенным в соответствующей главе.

Первое положение (5–15 кэВ, расширенная неопределенность поглощенной дозы в воде не более 2,7 % при $k = 2$) обосновано бюджетами табл. 2.5–2.8; определяющий вклад вносят отношение W/e , отношение массовых коэффициентов поглощения энергии и поправка на обратное рассеяние от фантома, рассчитанная методом Монте-Карло.

Второе положение (протонное и ионное излучения 30–1000 МэВ, НСП не более 0,9 %, СКО не более 0,4 % в графите, 1,9 % в воде) обосновано бюджетами табл. 3.3 и 3.4. Проверка показывает, что приведенные суммарные значения согласуются с составляющими.

Третье положение (брахитерапия, 3,2 % в воде) обосновано бюджетами табл. 4.2 и 4.4 с отдельной оценкой для источников с энергиями фотонов выше и ниже 100 кэВ.

Четвертое и пятое положения (флюенс, плотность потока и энергия ТЗЧ, не более 2,4 %) обоснованы бюджетами табл. 5.4, 5.5 и 6.2; доминирующий вклад вносит измерение заряда (тока), что соответствует физике метода.

Шестое положение (пробеги протонов и ТЗЧ – не более 2,4 %, соотношение «энергия – пробег» – не более 5 %) обосновано бюджетом табл. 7.6 и расчетом по формулам (57) – (59), результаты которого сведены в табл. 7.8.

Выбор методов в каждом случае обоснован сравнительным анализом альтернатив (разделы 2.1, 3.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1) и является методически правильным.

Достоверность результатов

Достоверность результатов подтверждается:

- применением абсолютных методов измерений, уравнения которых содержат величины, прослеживаемые к единицам СИ (электрическим единицам и массе);
- перекрестной проверкой результатов моделирования независимыми кодами (Geant4, FLUKA, PHITS, EGSnrc, MCNP, SHIELD); для поправки $k_{вз}$ расхождение между Geant4 и FLUKA не превышает 0,1 %;
- экспериментальной проверкой аппаратуры на ускорителях различного типа, включая циклотрон У-400-Н ЛЯР ОИЯИ;
- применением для оценки доли энергии, уносимой вторичными нейтронами, средств измерений из состава другого государственного первичного эталона – ГЭТ 117-2023;
- двумя независимыми способами контроля достоверности показаний цилиндра Фарадея;
- успешными государственными испытаниями и утверждением разработанного комплекса в качестве Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024.

Научная новизна

Научной новизной обладают следующие результаты:

- впервые на основе связанного радиационно-теплового моделирования установлены количественные закономерности влияния вакуумных зазоров, ядерных взаимодействий и тепловых градиентов в квазиadiaбатических

графитовых калориметрах в пучках протонов (до 1000 МэВ) и ионов углерода (до 430 МэВ/нуклон), а также в калориметре концентрического типа для брахитерапевтических источников с учетом собственного нагрева источника;

- решена задача воспроизведения единицы поглощенной дозы слабопроникающего рентгеновского излучения (5–15 кэВ) на радиационной глубине 7 мг/см² с применением экстраполяционной ионизационной камеры со сменными графитизированными окнами и восстановления реального спектра излучения как решения регуляризованной обратной задачи;

- предложена процедура согласования разнородных справочных данных о тормозных способностях, включающая приведение данных к единым значениям плотности и среднего потенциала ионизации, взвешенное усреднение и непрерывную аппроксимацию во всем диапазоне энергий;

- впервые в Российской Федерации единицы энергии, флюенса и плотности потока ТЗЧ воспроизводятся на уровне государственного первичного эталона через электрические единицы – методами калориметрии полного поглощения и прямого сбора заряда;

- создан аппаратурно-методический комплекс, позволяющий получать метрологически прослеживаемые соотношения «энергия – пробег» и выполнять экспериментальную проверку справочных данных ICRU, NIST, SRIM и ATIMA.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологии построения уравнений измерений первичных эталонов для сложных полей ионизирующего излучения: уравнение измерений представляется произведением физически интерпретируемых поправок, каждая из которых получена из связанной физико-математической модели и имеет собственную оценку неопределенности.

Практическая значимость работы подтверждается нормативно закрепленными результатами: проведены три совершенствования ГЭТ 38 (2011, 2021 и 2024 гг.), последовательно разработаны и введены в действие три государственных поверочные схемы, разработана и аттестована методика измерений МВИ 410/0093-25, эталонные средства использованы при выполнении ОКР «Система-2020», проведены испытания в целях утверждения типа универсального дозиметра и предварительные испытания эталонных измерителей энергии и флюенса ТЗЧ, аттестовано испытательное оборудование на базе протонного ускорителя.

Материалы диссертации, в частности методология построения уравнений измерений и бюджетов неопределенности первичных эталонов ионизирующих излучений, могут быть рекомендованы для использования в учебном процессе при подготовке специалистов по метрологии, в том числе на профильных кафедрах НИЯУ МИФИ.

Полнота опубликования результатов и апробация

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из них 13 – в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 7 работ индексируются в Scopus, 6 – в Web of Science; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты апробированы на международных и всероссийских конференциях, в том числе на заседании рабочей группы CCRI Международного бюро мер и весов, на Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», на конференции «Сертификация ЭКБ-2025».

Автореферат соответствует содержанию диссертации и правильно отражает ее основные положения, результаты и выводы.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение, в том числе следующим направлениям исследований:

3. Проведение фундаментальных научных исследований по изысканию и использованию новых физических эффектов с целью создания новых и совершенствования существующих методов и средств измерений высшей точности. Данному направлению отвечают установленные закономерности формирования теплового отклика графитовых калориметров и калориметров полного поглощения, закономерности влияния вторичной электронной эмиссии и неполного сбора заряда в цилиндрах Фарадея и созданные на их основе первичные измерительные преобразователи.

4. Развитие теории измерений, включая квантовые. Данному направлению отвечают построение уравнений измерений первичных эталонов в виде произведения физически обоснованных поправок с отдельной оценкой их неопределенности, постановка и решение обратной задачи восстановления спектра с оценкой неопределенности решения, процедура согласования справочных данных и методика оценки неопределенности соотношения «энергия – пробег».

7. Разработка и внедрение новых государственных эталонов единиц измерений величин, позволяющих существенно повысить единство и точность измерений. Данному направлению отвечают три совершенствования ГЭТ 38 и утверждение разработанного комплекса в качестве Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024.

Замечания по диссертационной работе

1. В разделе 2.3.4 описаны два варианта усовершенствованного метода восстановления спектра (пути А и В), однако не указано, какой из них использован при расчете отношений массовых коэффициентов поглощения энергии, вошедших в бюджет неопределенности (табл. 2.7, 2.8).

2. Поправка $k_{вз}$ рассчитана двумя способами – с помощью Geant4/FLUKA для всего поглотителя (раздел 3.3.3) и с помощью SHIELD для центральной ячейки (табл. 3.2), причем результаты расчетов различаются. Следовало пояснить, какие значения используются в уравнении (13).

3. Предложенная в разделе 7.4 методика контроля достоверности показаний цилиндра Фарадея двумя независимыми способами – с эталонным β -источником и разрядом эталонного конденсатора – представляет самостоятельную практическую ценность. Целесообразно рассмотреть возможность ее применения при периодическом контроле метрологических характеристик эталона и рабочих эталонов.

4. В главе 6 недостаточно подробно описано, каким образом определяется число частиц N во время калориметрических измерений энергии, поскольку калориметр и цилиндр Фарадея не могут находиться в пучке одновременно.

5. В разделе 7.1 в качестве преимущества разработанного комплекса указана возможность измерения пробегов в материалах, имитирующих интересующие среды, в частности в кремнии. Представляется целесообразным привести сведения о планах по определению соотношений «энергия – пробег» в кремнии, представляющих непосредственный интерес для испытаний ЭКБ.

6. В работе имеются отдельные неточности редакционного характера и опечатки, которые не влияют на существо полученных результатов.

Указанные замечания носят в основном дискуссионный и уточняющий характер, касаются полноты изложения отдельных процедур оценки неопределенности и оформления, не затрагивают существа полученных результатов и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

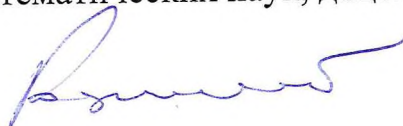
Заключение

Диссертация Берлянда Александра Владимировича «Совершенствование системы обеспечения единства измерений поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучений и энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема, имеющая важное значение для страны: созданы методы и средства воспроизведения единиц поглощенной дозы рентгеновского излучения низких энергий, протонного и ионного излучений, излучения брахитерапевтических источников, а также энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц на основе абсолютных методов измерений, и на этой основе сформирована система метрологической прослеживаемости, закрепленная в Государственном первичном эталоне ГЭТ 38-2024 и государственной поверочной схеме. Внедрение результатов вносит значительный вклад в обеспечение качества лучевой терапии и достоверности радиационных испытаний электронной компонентной базы.

По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, степени обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Берлянд Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой «Физико-технические проблемы метрологии» (№ 78) Института лазерных и плазменных технологий,
доктор физико-математических наук, доцент



Борисюк Петр Викторович

Адрес 115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Тел. +7(915)050-72-60

E-mail: pvborisyuk@mephi.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», <https://mephi.ru/115409>, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. +7 495 788-56-99, e-mail: info@mephi.ru

ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ

ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ДИРЕКТОРА ДКПСР
НОСОВА О.В.

