

## ОТЗЫВ

официального оппонента

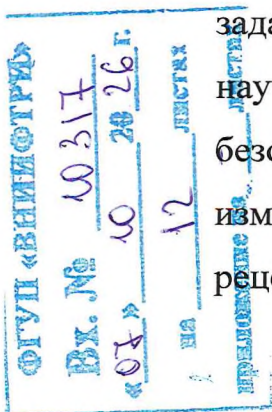
доктора технических наук ВАСИЛЬЕВА ИГОРЯ ОЛЕГОВИЧА,  
советника отдела технического регулирования, стандартизации и  
метрологического обеспечения Департамента развития научно-  
производственной базы ядерного оружейного комплекса Государственной  
корпорации по атомной энергии «Росатом»,  
на диссертационную 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 на 381 странице и автореферат.  
Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы  
из 282 наименований и шести приложений. Работа содержит 102 рисунка и 33  
таблицы. Работа выполнена на ФГУП «ВНИИФТРИ», научный консультант –  
доктор физико-математических наук Ю.Е. Титаренко.

Отзыв подготовлен на основе рассмотрения и анализа диссертации,  
автореферата и опубликованных работ соискателя.

### Актуальность темы диссертации

Ионизирующие излучения применяются для решения широкого круга  
задач – в атомной энергетике, ядерной медицине, радиационных технологиях,  
научных исследованиях, контроле технологических процессов и обеспечении  
безопасности. Среди этих областей выделяются две, которые предъявляют к  
измерениям особенно жесткие требования и на которых сосредоточена  
рецензируемая работа. Первая – лучевая терапия: ошибка в дозе прямо



сказывается на исходе лечения. Вторая – радиационные испытания электронной компонентной базы (ЭКБ) и аппаратуры на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). От результатов таких испытаний зависит надежность космических аппаратов, систем специального назначения и изделий ядерного оружейного комплекса.

Во второй области состояние метрологического обеспечения к началу исследований соискателя в наибольшей степени не соответствовало предъявляемым требованиям. Государственных эталонов энергии, флюенса и плотности потока ТЗЧ в Российской Федерации не существовало. Испытательные центры применяли собственные, не согласованные между собой методики контроля параметров пучка. Поэтому результаты испытаний одного и того же изделия на разных ускорителях нельзя было корректно сопоставить. Для испытаний на стойкость к одиночным радиационным эффектам это существенно: определяемые по результатам испытаний характеристики изделий, в том числе сечение одиночных эффектов и его зависимость от линейной передачи энергии, рассчитываются непосредственно по значениям флюенса, энергии и пробега ионов. Погрешность результатов измерений параметров пучка, таким образом, непосредственно входит в погрешность результатов испытаний.

С учетом курса на технологический суверенитет, расширения номенклатуры отечественной ЭКБ и роста объема испытаний, которые проводятся в рамках Межведомственного распределенного центра радиационных испытаний ЭКБ (МРЦРИ), создание эталонной базы для параметров пучков ТЗЧ относится к первоочередным задачам метрологического обеспечения обороны и безопасности страны. Не менее значима и задача медицинского направления – обеспечить прослеживаемость к первичному эталону для рентгенотерапии, протонной и ионной терапии и брахитерапии.

Таким образом, тема диссертации А.В. Берлянда, посвященной важной государственной научно-технической проблеме, является актуальной в научном плане и востребованной с практической точки зрения.

### **Общая характеристика работы**

Содержание работы построено в соответствии с порядком решения поставленных задач. Сначала соискатель анализирует состояние вопроса и формулирует противоречие между существующей эталонной базой и современными требованиями к точности. Затем он последовательно решает частные задачи для каждой группы измеряемых величин. В конце результаты сводятся в единую структуру Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024 и государственной поверочной схемы.

Следует отметить широту охвата исследований. В одной работе рассмотрены величины, которые требуют принципиально разных физических методов воспроизведения: ионометрии в экстраполяционной камере, квазиadiaбатической калориметрии, калориметрии полного поглощения и прямого сбора заряда в цилиндре Фарадея. Для каждой величины соискатель не заимствует готовое решение, а выбирает метод, обосновывает его и доводит до эталонного уровня.

Содержание работы целесообразно рассмотреть по трем блокам.

**Дозиметрия фотонного излучения низких энергий и брахитерапии (главы 2 и 4).** Главный результат блока – отказ от косвенных схем в пользу прямого воспроизведения поглощенной дозы в условиях, где это традиционно считалось крайне затруднительным. Для рентгеновского излучения 5–15 кэВ создана экстраполяционная ионизационная камера со сменными входными окнами, для брахитерапевтических источников – концентрический графитовый калориметр. Конструкцию в обоих случаях определяло моделирование, выполненное до изготовления. Разработанный алгоритм восстановления истинного спектра по аппаратурному спектру CdTe-спектрометра используется в двух главах и служит связующим звеном между

измерениями в одной среде и дозой в другой. Для брахитерапии это дает кратное снижение неопределенности результатов измерений дозы в воде по сравнению со схемой через мощность кермы в воздухе и дозовую постоянную.

**Дозиметрия протонного и ионного излучений (глава 3).** Графитовые калориметры охватывают диапазон энергий от 30 до 1000 МэВ для протонов и до 430 МэВ/нуклон для ионов углерода. Методически наиболее ценной представляется работа с исходными данными. Соискатель не выбирает одну из таблиц тормозных способностей, а проводит критический анализ и взвешенное согласование данных ICRU, NIST и расчетных кодов, приводя их к единым значениям плотности и потенциала ионизации графита.

**Параметры пучков тяжелых заряженных частиц (главы 5–7).** Для отрасли – потребителя результатов испытаний на радиационную стойкость этот блок имеет наибольшее практическое значение. Соискатель последовательно реализовал принцип, при котором значение каждой величины определяется через единицы других величин, прослеживаемые к соответствующим государственным первичным эталонам:

число частиц определяется через электрический заряд с прослеживаемостью к эталонам заряда и тока;

энергия частиц – через тепло, измеренное калориметром полного поглощения с электрическим замещением;

пробег – через те же средства в сочетании с поглотителями переменной толщины.

Тем самым впервые в стране для испытательных стендов создана основа, при которой параметры пучка измеряются, а не принимаются по паспортным данным ускорителя. Инженерные решения выполнены с учетом реальных условий испытаний:

устройство дискретной смены поглотителей с 36 комбинациями толщин управляется дистанционно, без разгерметизации вакуумной камеры;

свинцово-молибденовый поглотитель рассчитан на ионы с пробегами в десятки микрометров;

габариты аппаратуры проверены на соответствие вакуумным камерам вывода циклотрона У-400-Н ЛЯР ОИЯИ.

Испытания в пучках Ar, Kr и Xe показали, что разработанная аппаратура пригодна для работы на действующих испытательных стендах.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность**

Исследования проводились с применением апробированных физических моделей. Для ключевых поправок расчеты выполнены несколькими независимыми кодами (Geant4, FLUKA, PHITS, EGSnrc, MCNP), и результаты сопоставлены между собой. Выбор методов является обоснованным и методически правильным.

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

Первое положение (глава 2) устанавливает, что поглощенная доза рентгеновского излучения с энергиями от 5 до 15 кэВ определяется в воде с расширенной неопределенностью не более 2,7 % ( $k = 2$ ). Во втором положении (глава 3) заявлено воспроизведение поглощенной дозы протонного и ионного излучений с энергиями от 30 до 1000 МэВ в графите с НСП не более 0,9 % и СКО не более 0,4 %, а в воде – с расширенной неопределенностью 1,9 % ( $k = 2$ ). Третье положение (глава 4) относится к брахитерапии: в графите доза воспроизводится с теми же НСП и СКО, в воде – с расширенной неопределенностью не более 3,2 % ( $k = 2$ ).

Положения, касающиеся параметров пучков тяжелых заряженных частиц, характеризуются близкими значениями неопределенности. Флюенс и плотность потока ТЗЧ (глава 5) и энергия ТЗЧ (глава 6) воспроизводятся с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ( $k = 2$ ). Пробеги протонов и ТЗЧ (глава 7) определяются с неопределенностью не более 2,4 %, а

экспериментальное соотношение «энергия – пробег» – с неопределенностью не более 5 %.

Достигнутые характеристики соответствуют требованиям обеих областей применения. Для лучевой терапии требуется не более 3 % по дозе. Для испытаний ЭКБ допустимо не более 10 % по параметрам пучка, так что получен запас по точности примерно в четыре раза. Этот запас необходим, чтобы передать единицы величин рабочим средствам измерений испытательных центров без потери требуемой точности.

**Достоверность** результатов подтверждается несколькими независимыми путями:

экспериментальной проверкой аппаратуры на ускорительных установках различного типа: медицинском протонном комплексе «Прометеус», исследовательском протонном циклотроне, пучке ионов углерода ускорителя У-70 (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, г. Протвино) и циклотроне У-400-Н ЛЯР ОИЯИ;

применением средств измерений из состава другого государственного первичного эталона – ГЭТ 117-2023 – для оценки доли энергии, уносимой вторичными нейтронами;

разработанной методикой контроля достоверности показаний цилиндра Фарадея двумя независимыми способами – радиационным (эталонный  $\beta$ -источник) и электрическим (разряд эталонного конденсатора);

успешными государственными испытаниями и утверждением ГЭТ 38-2024.

### **Научная новизна**

Научной новизной обладают следующие результаты работы:

предложен и реализован единый методологический принцип создания первичных преобразователей. Он основан на совместном физико-математическом моделировании: распределение поглощенной энергии, рассчитанное методом Монте-Карло, используется как исходные данные для

конечно-элементного расчета теплопереноса или электрических полей, а результаты моделирования затем проверяются экспериментально. На этой основе получены количественные закономерности, которые определяют поправки в уравнениях измерений калориметров и цилиндров Фарадея.;

впервые создан метрологически прослеживаемый метод определения соотношений «энергия – пробег» для протонов и тяжелых ионов. Метод позволяет экспериментально проверять справочные данные (ICRU, SRIM, NIST PSTAR, ATIMA), на которых основаны и планирование облучения в адронной терапии, и выбор режимов испытаний ЭКБ;

впервые в Российской Федерации единицы энергии, флюенса и плотности потока ТЗЧ воспроизводятся на уровне государственного первичного эталона. Номенклатура ГЭТ 38 расширена настолько, что эталон по существу стал комплексом для метрологического обеспечения всей ускорительной техники прикладного назначения.

### **Теоретическая ценность научных результатов**

Теоретическая ценность работы состоит в следующем:

1. Соискатель сформулировал и обосновал подход к построению уравнения измерений первичного эталона для сложных полей излучения. Уравнение представляется как произведение физически интерпретируемых поправок, каждая из которых получена из связанной радиационно-тепловой или радиационно-электрической модели и имеет собственную оценку неопределенности. Такой подход переносим на другие виды излучений и другие типы первичных преобразователей.

2. Разработанная процедура согласования разнородных справочных данных о тормозных способностях вносит вклад в теоретические основы дозиметрии адронных пучков. Процедура включает приведение данных к единым физическим параметрам, взвешенное усреднение и непрерывную аппроксимацию во всем диапазоне энергий. Ее можно применять при актуализации отечественных справочных данных.

3. Полученные экспериментальные соотношения «энергия – пробег», прослеживаемые к единицам СИ, создают основу для независимой проверки и уточнения физических моделей торможения ионов, которые заложены в расчетные коды. Для тяжелых ионов с энергиями в единицы МэВ/нуклон эти модели заметно расходятся между собой.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы подтверждается нормативно закреплёнными и внедрёнными 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 для брахитерапевтических источников;

разработанные эталонные средства использованы в ОКР «Система-2020» по заданию Росстандарта;

аттестовано испытательное оборудование на базе протонного ускорителя, проведены испытания в целях утверждения типа универсального дозиметра и предварительные испытания эталонных измерителей энергии и флюенса ТЗЧ.

Результаты диссертации рекомендуется использовать:

в организациях Госкорпорации «Росатом» и других ведомств, которые проводят радиационные испытания ЭКБ и аппаратуры, – для аттестации испытательного оборудования и калибровки штатных систем мониторинга пучка;

в испытательных центрах МРЦРИ и на ускорительных комплексах ОИЯИ и НИЦ «Курчатовский институт» – для обеспечения сопоставимости результатов испытаний на разных установках;

в центрах протонной и ионной терапии, радиологических отделениях онкологических учреждений и организациях, которые поверяют клинические дозиметры;

в учебном процессе при подготовке специалистов по метрологии ионизирующих излучений и радиационной стойкости.

### **Полнота опубликования результатов и апробация**

Основные результаты работы в достаточной мере отражены в 15 научных работах. Из них 13 опубликованы в изданиях из перечня ВАК (4 – категории К1, 7 – категории К2, 1 – категории К3), 7 индексируются в Scopus, 6 – в Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Апробация работы проведена непосредственно в профессиональном сообществе потребителей результатов: на заседании Исполнительного комитета МРЦРИ, на конференции «Сертификация ЭКБ-2025», на Всероссийской конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», на круглом столе с Госкорпорацией «Росатом» в рамках форума «Метрология без границ». Это говорит о том, что результаты обсуждены с теми, кто будет их применять.

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

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:

1. Создание новых научных, технических и нормативно-методических решений, обеспечивающих повышение качества продукции. Созданная

эталонная база параметров пучков ТЗЧ обеспечивает достоверность радиационных испытаний и, как следствие, качество и надежность ЭКБ и аппаратуры специального и космического назначения.

2. Создание и совершенствование системы метрологического обеспечения приборостроения, в том числе цифровых технологий. Работа формирует метрологическое обеспечение ускорительной испытательной техники и средств измерений параметров пучков, включая средства мониторинга испытательных стендов.

3. Совершенствование деятельности метрологических служб предприятий и организаций по обеспечению единства измерений в своей сфере. Разработанные средства и методы позволяют метрологическим службам испытательных центров и медицинских организаций аттестовать оборудование и обеспечивать прослеживаемость результатов к государственному первичному эталону.

### **Замечания по диссертационной работе**

По содержанию работы возникли следующие вопросы и замечания.

1. Согласно приложению 3, государственный первичный эталон воспроизводит флюенс и плотность потока частиц начиная с  $10^7 \text{ см}^{-2}$  и  $10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , тогда как для рабочих эталонов и средств измерений флюенса в той же поверочной схеме нижний предел указан  $10^2 \text{ см}^{-2}$  (пп. 5.1.1 и 6.7). В работе не раскрыто, каким образом единица передается в эту область, характерную для испытаний ЭКБ на одиночные эффекты.

2. В главе 3 представлены результаты экспериментальных исследований графитовых калориметров в пучках протонов на комплексе «Прометеус», энергия которых не превышает 330 МэВ. При этом во втором положении, выносимом на защиту, и в описании ГЭТ 38-2024 диапазон воспроизведения поглощенной дозы протонного и ионного излучений заявлен от 30 МэВ до 1000 МэВ. Требуется пояснение, каким образом экспериментально

подтверждались характеристики калориметров в области энергий выше 330 МэВ.

3. В разделе 7.3 процесс измерений пробегов и сопоставление с расчетными данными (таблица 7.7) приведены на примере протонов, тогда как в выводе к главе 7 указано, что аппаратурный комплекс испытан также в пучках ионов C, Ar, Kr и Xe. Диссертация выиграла бы, если бы в ней были приведены и результаты определения пробегов тяжелых ионов, представляющие наибольший интерес для испытаний ЭКБ.

4. В работе имеются отдельные неточности редакционного характера (опечатки, несогласованность отдельных обозначений и ссылок, повторы в списке литературы), которые не влияют на существо полученных результатов.

Указанные замечания носят в основном дискуссионный и редакционный характер и касаются направлений дальнейшего развития работы. Они не затрагивают значимости основных научных результатов и **не влияют на общую положительную оценку диссертации.**

### **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 ней решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное значение для страны: создана отечественная эталонная база и система метрологической прослеживаемости для поглощенной дозы в пучках рентгеновского, протонного и ионного излучений и при брахитерапии, а также для энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц. Внедрение результатов вносит значительный вклад в обеспечение качества лучевой терапии и достоверности радиационных испытаний электронной компонентной базы.