

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук Федорова Сергея Григорьевича**  
**на тему: «Разработка методов и средств повышения точности,**  
**расширения энергетических и измерительных диапазонов при**  
**воспроизведении и передаче единиц мощности поглощенной дозы,**  
**мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы**  
**нейтронного излучения»**

**по специальности 2.2.10 – «Метрология и метрологическое обеспечение»**

Современные средства надёжной и достоверной дозиметрии в целом и многоцелевого дозиметрического обеспечения в частности являются фактическим залогом качественного применения и использования атомной и ядерной энергетики в широком смысле. Так, намеренное использование нейтронных полей представляется интересным и актуальным способом организации радиотерапевтических процедур в здравоохранении в интересах оказания онкологической помощи населению. Неизбегаемая доза, которая сопутствует нормальному функционированию различных объектов использования атомной энергии, в частности атомных станций или, более широко, ядерно-физических установок, является одним из определяющих факторов, влияющих на организацию безопасного рабочего процесса. Дополнительные применения в области исследования геологических образцов, как в земной коре, так и в поиске, например, воды на других планетах, также связаны с использованием нейтронных полей. **Актуальность диссертационной работы** Федорова С.Г. связана именно с возможностью организации полноценного прослеживаемого профиля научно-методического сопровождения в области государственного регулирования и смежных областях промышленности и применения наукоёмких технологий, который позволит обеспечить единообразие получаемых измеримых характеристик нейтронных полей общего и специального назначения.

**Научная новизна** исследования заключается в надёжном и достоверном учёте множества сопутствующих факторов, влияющих на неопределённость передачи неизвестной опорной величины, в том числе в полях смешанных излучений, а также в целенаправленном успешно выполненном снижении неопределённостей подобного рода, что положительно сказывается на расширении возможностей использования нейтронных полей в различных сферах деятельности и отраслях хозяйства.

В качестве основной **практической значимости** диссертационного исследования можно отметить формирование усовершенствованного эталона ГЭТ 117-2023, который позволяет устойчиво, надёжно и достоверно формировать единицы мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы для передачи в интересах широкого круга потребителей.

Представленные научно-технические данные и результаты проведённых автором инженерно-технических и программно-технологических изысканий получены на большом фактическом материале, и, таким образом, **обосновывают достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**, которая подтверждается применением самосогласованного набора современных методов исследований, адекватного математического аппарата и средств анализа данных.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертационная работа Федорова С.Г. состоит из введения, четырёх основных глав, заключения, списка использованной литературы, а также дополнена восемью приложениями, содержащими дополнительную информацию о проведённом исследовании.

**Введение** работы в части описания актуальности темы автором описано достаточно сумбурно и содержит некоторые оторванные от общего контекста фразы без надёжной логической связки. Тем не менее, дальнейшая постановка целей и задач исследования, как и общие характерные для данной главы описания положений, выносимых на защиту, научной новизны, практической

значимости, порядке апробации диссертационной работы, не вызывают нареканий.

**Глава 1** диссертационного исследования является расширенным литературным обзором, в котором приведён исчерпывающий спектр методов измерения целевых показателей: мощности поглощённой дозы, мощности амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы в соответствие с рекомендуемыми определениями Международного агентства по атомной энергии. Отдельной выигрышной чертой настоящей главы является описание бюджета неопределённостей по описанным методам, что собственно и явилось обоснованием поиска возможностей по их существенному снижению.

Материал **Главы 2** посвящен разработке комплекса, охарактеризованного автором как «аппаратурно-методический», предназначенного для надёжного и достоверного воспроизведения единицы мощности поглощённой дозы нейтронного излучения. Стоит отметить, что автор приводит оценку (литературный источник 37) из диссертационного исследования 1972-го года, в котором была оценена величина изменения амплитуды счёта импульсов в 1 % на каждый шаг изменения концентрации примесей в  $10^{-3}$  % в газе между электродами. Однако, по мнению оппонента, в настоящее время технологическое развитие позволяет достаточно эффективно формировать технический этилен с очисткой на уровне 99,999-99,9995 %, известны методы дополнительной очистки и именно от состава примесей, приведённых автором, вплоть до снижения их общей концентрации до уровня одной миллиардной объёмной доли. Впрочем, общая проблема действительно сохраняется и описана автором в следующем абзаце: так, сам внутренний корпус, который ограничивает эффективный объём камер, действительно приводит к возникновению побочных примесей как результат воздействия на стенки камер. Таким образом, разработка стенда прецизионного наполнения в составе общего комплекса работ по передаче единицы мощности поглощённой дозы нейтронов является важным этапом обеспечения надёжности и достоверности всей процедуры. Помимо этого, автором учтены

дополнительные поправки: на неопределённости измерения фактической массы газа, циркулирующего в эффективном объёме ионизационных камер, измерения выполнены на прецизионном эталонном оборудовании; на искажение потока нейтронов стенкой внешнего корпуса, выполненные на основе метода Монте-Карло; на гомогенность материала стенки. В целом, так как конкретные методы и модели описания именно вычислительных подходов к моделированию камер, в диссертационной работе не приведены, а общее понятие метода Монте-Карло может относиться как к различным средам выполнения, так и к целому ряду задач, а, кроме этого, не приведены показатели статистики (фактического числа историй при выполнении расчётов) конкретные фактические поправочные коэффициенты также могут иметь свои внутренние погрешности. Несмотря на это, автору удалось добиться существенного уменьшения относительной расширенной неопределённости, при  $k = 2$ . Бюджет неопределённости в новом эталоне составил 2,70 %, что необычайно важно, и является, по сути, переходным звеном для следующей главы исследования.

Так, в **Главе 3** диссертационного исследования описаны фактические предлагаемые методы и методики рутинного формирования, например, поверочных схем, призванных осуществлять, в частности, регулярный регламентный контроль медико-физических нейтронных полей в широком смысле. Именно здесь актуальным аспектом становится возможность организации схемы расчёта и подтверждения фактических величин поглощённых доз нейтронного излучения на различных установках клинического назначения, которые формируют дозу по нескольким каналам, при этом обладая и дополнительным вкладом от гамма-излучения разнообразной природы. Отдельным аспектом стоит упомянуть введение автором блоков детекторов, который базируется на сцинтилляционном методе регистрации, благодаря использованию которых возможна взаимная передача единицы излучения между различными видами самого излучения, включая отдельные индивидуализированные блоки, встраиваемые в многоканальный

тракт регистрации сигнала и включаемые в порядок организации метрологического обеспечения. В целом, заявленная и продемонстрированная величина бюджета неопределённости полноценно отвечает общим требованиям, которые предъявляются в сфере государственного регулирования по обеспечению единства средств измерений в области здравоохранения, что открывает дорогу к надёжному и достоверному воспроизведению единицы мощности поглощённой дозы и переходе от неё к фактической величине интегральной поглощённой дозы, как основополагающего фактора биологического действия терапевтических установок. Впрочем, нельзя не отметить, что, несмотря на запроектированное и действительно достигнутое соответствие ожидаемых показателей закладываемым нормируемым значениям в области регулирования, известным фактом в области радиобиологии нейтронных полей является то, что спектральные характеристики самих нейтронных потоков существенно влияют как на качественные, так и на количественные показатели биологического поражения опухолей, здоровых тканей, органов и тканей организма. В области задач радиационной защиты зачастую используются коэффициенты качества излучения; в области терапевтической радиологии на текущий момент остаётся открытой даже задача эффективного сопоставления результатов лечения, получаемых, например, при контактной брахитерапии с источниками калифорния-252, в сравнении с реакторными нейтронами исследовательских быстрых реакторов (около 4000 пациентов, пролеченных в мире по известным данным), а фактическое внедрение, например, нейтронной компактной терапевтической установки всё равно потребует предварительного проведения клинических испытаний. Несомненно, подобное уже медицинское применение технологии нейтронного облучения просто немыслимо без надёжного фундамента, который и выражается в надёжном и высококачественном метрологическом обеспечении.

В **Главе 4** автором описана процедура полноформатной профильной разработки аппаратного комплекса с сопутствующим интерактивным

программным обеспечением, позволяющая организовывать высокоэффективные измерения мощностных характеристик полей нейтронного излучения, а именно мощности амбиентной и мощности эквивалентной дозы с достаточным запасом достоверности измерений по энергетическому диапазону, а также с учётом вторичного вклада действующих компонент излучения. Автор повторно анализирует типовые методы спектрометрии, опираясь на материалы первой главы своей работы, однако в настоящей главе приводит иное разумное обоснование, которое служит выбором последующей методики проведения измерений, в том числе на основе оцениваемых самостоятельно спектральных характеристик по типам вторичного излучения, возникающего при взаимодействии нейтронов. Впрочем, нельзя не отметить, что методика фактического получения конкретных численных значений на Рис. 4.3 не вполне ясна из приведённого текста диссертационного исследования, однако в данном случае это не является сутевым замечанием, так как вся дальнейшая глава как раз посвящена построению фактических аппаратных методов коррекции и учёта реальных данных, получаемых физическими средствами измерений, с учётом функций чувствительности, для получения достоверных значений. Работа автора здесь сводится к переводу аппаратного спектра к фактическим восстановленным спектральным показателям, что осуществляется на основе групповых операций над различными скоростями счёта по выбранным энергетическим группам. Это позволило обеспечить надёжное совпадение с рекомендуемыми источниками МАГАТЭ, что необычайно важно в контексте международного воспроизведения единиц мощности доз. Оцененная относительная неопределённость и вклады в суммарный бюджет неопределённости позволяют говорить о создании высоконадёжного метода измерения мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов доз.

Материалы диссертационной работы отражены в 21 статье в рецензируемых научных изданиях, в том числе в 8 из перечня, рекомендованного Высшей аттестационной комиссией для отражения

результатов подобного рода, а также апробированы в 40 докладах на всероссийских и международных научных конференциях. Помимо этого, значимость работ автора подтверждена одним патентом на изобретение и тремя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, зарегистрированными Федеральным институтом промышленной собственности (ФИПС) в установленном порядке. Отдельно стоит отметить 7 актов внедрения результатов диссертационного исследования в предприятиях реального сектора экономики, а также вклад в целом в развитие отечественного метрологического регулирования в Российской Федерации, что подтверждается назначением автора ученым-хранителем государственного эталона ГЭТ 117-2023.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Среди замечаний к диссертационной работе можно выделить следующее:

- в работе фактически отсутствует «Заключение» работы, а под этим заголовком автор приводит «Выводы» диссертационного исследования; автору следовало бы сделать более надёжное заключение, в том числе описать перспективы дальнейших работ и направления будущих исследований в данной области.

- из материала главы 3 видно, что единица мощности поглощенной дозы нейтронов передаётся для ядерно-физических установок медицинского назначения на основании «первичной» величины эталона ГЭТ 117-2023, который был разработан и оценен в главе 2; в то же время, и как подчеркивается самим автором, медицинские источники имеют особенность в виде смешанных полей, при этом можно с большой уверенностью сказать, что как различные установки, так и, потенциально, даже одна и та же установка медицинского назначения (медицинское изделие) одного производителя для каждой отдельной поставки установки может иметь различные пропорции между гамма- и нейтронными частями, формирующими общую дозу излучения, а эталон ГЭТ 117-2023 описывает только нейтронную

составляющую. Автору предлагается показать своё видение проблемы именно калибровки (в широком смысле) отдельных разнородных источников, в частности, будет ли для медицинского назначения целесообразно использовать различные группы эталонов при трансфере нейтронной терапии для широкого применения в здравоохранении, либо, например, ожидается, что разработчики каждой медицинской установки для организации нейтронного облучения должны будут максимально снижать возможные возникающие неопределённости между отдельными поставками одной установки, как и сохранять, например, спектральные свойства в случае модернизации.

- в общем случае, метод Монте-Карло по ссылкам на литературу содержит только описания использованных библиотек сечений ядерных взаимодействий (ENDF/B-VIII.0), в то время как известно, что и для взаимодействий фотонных пучков существует более одной библиотеки оцененных данных, в частности EPDL97, отдельные ENDF/B-VIII.1 для фотоатомных и фотоядерных взаимодействий, JENDL и т. п., экспериментальных данных EXFOR; различные средства Монте-Карло, как и, например, самостоятельно написанные средства построения оценок на основании метода Монте-Карло, могут реализовывать и различные физические модели гамма-взаимодействий, что автором не было указано.

- автором не приведены показатели статистики выполнения Монте-Карло расчётов (в широком смысле – использованное число историй).

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертационная работа Федорова С.Г. «Разработка методов и средств повышения точности, расширения энергетических и измерительных диапазонов при воспроизведении и передаче единиц мощности поглощенной дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения» является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научно-технической инженерно-технологической задачи метрологического обеспечения, имеет существенное значение для развития страны.

Таким образом, диссертационное исследования Федорова С.Г. в полной мере отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» на основании Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» в редакции от 18.07.2026, а её автор Федоров Сергей Григорьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,

заведующий лабораторией медицинской радиационной физики,

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Соловьев Алексей Николаевич



09.09.2026

Контактные данные:

тел.: +7 (484) 399 3297 доб. 7391, e-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 03.01.01 – Радиобиология

Адрес места работы: 249036, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4.

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации

тел.: +7 (484) 399 7013; e-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru

Подпись сотрудника МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России «заверяю»:

Заведующий отделом кадров

МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиала

ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России

10.09.2026



О.В. Ильина