

Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук
(ИПФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИПФ РАН
академик РАН

Г.Г. Денисов

(подпись)

«15» мая 2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу

Шейн Татьяны Викторовны

«Оптимизация системы формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии»,

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность работы:

Диссертационная работа Т.В. Шейн посвящена оптимизации системы формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей на базе ускорительного источника с литиевой мишенью. Актуальность исследования определяется развитием БНЗТ как перспективного метода селективного лучевого воздействия, способного повысить эффективность лечения опухолей при снижении нагрузки на здоровые ткани. Переход от реакторных источников к ускорительным делает особенно востребованными исследования, направленные на получение терапевтического эпитеплового пучка, удовлетворяющего современным рекомендациям МАГАТЭ. Работа также актуальна в связи с необходимостью создания отечественных решений для клинического применения, планирования облучения и проведения доклинических исследований.

Научная новизна диссертационной работы:

Научная новизна диссертации состоит в комплексном решении задачи оптимизации системы формирования пучка нейтронов для ускорительной БНЗТ на основе реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$. Автором модернизирован код NMC: реализованы источник нейтронов и фотонов, перенос γ -излучения, учет теплового рассеяния и расчет дозовых компонент. Определены оптимальные диапазоны энергий нейтронов и протонов для

различных задач БНЗТ. Установлено, что для терапевтического пучка оптимальны энергия протонов 2,3 МэВ, составной замедлитель из фторида магния и фторида алюминия и составной отражатель из свинца и графита. Для *in vitro* и *in vivo* исследований на лабораторных животных обосновано применение энергии 2,05 МэВ и водородосодержащего замедлителя с объемным вкраплением висмута.

Научная и практическая значимость полученных результатов:

Практическая значимость диссертации Т.В. Шейн не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы могут использоваться в клинических исследованиях методики БНЗТ на базе медицинских учреждений, в организациях, работающих в области физики ускорителей заряженных частиц, нейтронной физики. Научная значимость работы заключается в развитии методов численного моделирования переноса нейтронов и γ -излучения применительно к задачам БНЗТ, а также в получении новых данных о параметрах пучка, обеспечивающих терапевтическую эффективность. Практическая значимость состоит в том, что по результатам расчетов разработаны, изготовлены и верифицированы системы формирования пучка нейтронов для клинических и доклинических задач. Созданный функционал кода NMC позволяет рассчитывать компоненты дозы, планировать облучение клеточных культур, лабораторных и домашних животных, а также служит основой для последующего применения в клинической практике. Результаты работы ориентированы на использование в источнике VITA и в клинических испытаниях БНЗТ.

Обоснованность и достоверность полученных результатов:

Обоснованность результатов обеспечена использованием современной методологии, включающей численное моделирование методом Монте-Карло, опору на рекомендованные ядерные данные, сопоставление с эталонными расчетами и экспериментальную верификацию. Достоверность подтверждается сравнением результатов кода NMC с тестовой задачей в фантоме Снайдера, где отклонения от эталонных данных невелики, а также хорошим согласием расчетных и экспериментальных распределений борной и фотонной доз. Существенным подтверждением служат проведенные исследования на клеточных культурах, лабораторных животных и домашних животных со спонтанными опухолями. Апробация результатов на международных и российских конференциях и публикации в рецензируемых изданиях также подтверждают их надежность.

Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 10 научных статьях в международных и российских журналах (в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России).

Содержание диссертации и ее завершенность:

Диссертация изложена на 117 страницах, состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 53 рисунка, 14 таблиц и список литературы из 74 наименований.

В введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения об апробации, публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе рассмотрены требования к терапевтическому пучку нейтронов для БНЗТ, описаны основные элементы системы формирования пучка, приведены компоненты поглощенной дозы, дан обзор существующих решений и рекомендаций МАГАТЭ. Глава создает необходимую теоретическую и методическую основу для последующих исследований.

Во второй главе описана модернизация кода статистического моделирования NMC. Автор реализовал моделирование переноса фотонов, источники нейтронов и фотонов для литиевой мишени, блок расчета дозы и обработку рассеяния тепловых нейтронов. Проведена верификация кода на тестовой задаче с фантомом Снайдера и определен оптимальный энергетический диапазон нейтронов для БНЗТ. Отдельное значение имеет расчет выхода нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ и реализация соответствующего источника в коде.

Третья глава посвящена оптимизации системы формирования пучка для клинической БНЗТ. Последовательно исследуются материалы и размеры замедлителя и отражателя, влияние энергии протонного пучка, проводится численная оптимизация конструкции. Полученные решения верифицируются экспериментально. В результате предложена система формирования пучка для клинических испытаний, обеспечивающая параметры, близкие или соответствующие рекомендациям МАГАТЭ.

В четвертой главе решается задача создания системы формирования пучка для исследований с клеточными культурами и лабораторными животными. Обоснован выбор водородосодержащих замедлителей с висмутом, выполнена оптимизация геометрии, в том числе формы замедлителя, и определены параметры генерации нейтронов, эффективные для доклинических исследований.

В пятой главе показано практическое применение разработанного кода для характеристики нейтронного пучка и планирования экспериментов *in vitro* и *in vivo*. Приведены результаты расчета дозовых и спектральных характеристик в ряде биомедицинских исследований, включая облучение клеточных культур, мышей и домашних животных со спонтанными опухолями. Тем самым продемонстрирована работоспособность созданных инструментов в реальных прикладных задачах.

В заключении подведены итоги исследования и четко сформулированы основные результаты, соответствующие поставленным цели и задачам.

В целом диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой решена важная научно-техническая задача оптимизации системы формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии и сопутствующих исследований. Содержание диссертации отличается логичностью, внутренней согласованностью и достаточной полнотой изложения, а полученные результаты обладают научной новизной, практической значимостью и подтверждены расчетно-экспериментально.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в области исследования.

Личный вклад автора

Все результаты, на основе которых сформулированы защищаемые положения и выводы диссертации, получены автором лично.

Замечания и пожелания:

Проведенные Т.В. Шейн исследования и их результаты не вызывают серьезных замечаний. К работе может быть сформулирован ряд незначительных пожеланий.

1. В диссертации присутствуют отступления не совсем уместные для научной квалификационной работы, описывающие историю взаимодействия с китайскими поставщиками материалов или некоторые эпизоды из жизни научного руководителя при написании книг с соавторами.
2. На рисунках, где представлены схемы разных вариантов систем формирования нейтронного пучка, было бы хорошо указать пространственный масштаб.
3. В главе 5 при описании различных серий экспериментов информация о флюенсе приводится в разных единицах, что неудобно для быстрого сравнения. Например, на стр.96 флюенс приведен в единицах плотности потока нейтронов, а на стр. 97 для характеристики воздействия на животных приводятся параметры протонного пучка (ток и энергия), бомбардирующего литиевую мишень.
4. Первое положение, выносимое на защиту, можно было бы сформулировать более строго, указав конкретные параметры нейтронного пучка, полученные на выходе из системы формирования пучка. Формулировка «параметры нейтронного потока, пригодные для проведения БНЗТ» может со временем потерять актуальность по ходу клинических исследований.

5. В третьем положении, выносимом на защиту, следовало бы указать какой конкретно функционал был добавлен для достижения обозначенных результатов. Без этого положения не является полностью самостоятельным утверждением.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не снижают важности и достоверности полученных в диссертации Т.В. Шейн результатов. В целом, диссертационная работа производит очень хорошее впечатление.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации. Замечаний к автореферату не предъявляется.

Заключение семинара Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» по диссертации Т.В. Шейн на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Татьяны Викторовны Шейн «**Оптимизация системы формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии**» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника является научно-квалификационной работой, в которой получены важные результаты, имеющие принципиальную значимость для развития ускорительных источников нейтронов и их применения для бор-нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний.

Диссертационная работа Т.В. Шейн «**Оптимизация системы формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии**» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв составил:

Скалыга Вадим Александрович

Заместитель директора по научной работе ИПФ РАН

Доктор физико-математических наук

Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,

адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

тел: +7 (915) 949-27-11

эл. почта: skalyga@ipfran.ru

«14» мая 2026 г.

В.А. Скалыга

Материал диссертации Т.В. Шейн «Оптимизация системы формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии» рассмотрен на семинаре Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» 21 апреля 2026 года.

Голубев Сергей Владимирович

Руководитель научного направления «Физика плазмы»

Доктор физико-математических наук

Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,

адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

тел: +7 (951) 902-57-85

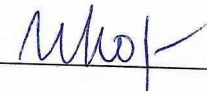
эл. почта: gol@ipfran.ru

«14» мая 2026 г.


С.В. Голубев

Подпись В.А. Скальги и С.В. Голубева заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН


И.В. Корюкин