

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Скалыги Вадима Александровича

на диссертационную работу

Соколовой Евгении Олеговны

«Исследование и оптимизация тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов»,

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:

Исследования с использованием нейтронов в настоящее время находятся на пике востребованности. Широчайший спектр фундаментальных задач в областях физики твердого тела и ядерной физики, растущий спрос на прикладные исследования для медицины и систем безопасности делают разработку компактных и безопасных нейтронных источников крайне актуальной проблемой. Нейтронные источники на основе линейных ускорителей сегодня являются одним из наиболее перспективных решений.

В диссертационной работе Е.О. Соколовой представлены результаты, полученные в ходе разработки нейтронного источника на основе тандемного ускорителя для исследований и непосредственного медицинского применения в области бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

БНЗТ – один из наиболее перспективных новых методов лучевой терапии онкологических заболеваний. Преимущества БНЗТ уже были продемонстрированы при лечении новообразований, устойчивых к любым другим видам терапевтических воздействий. Данная диссертационная работа посвящена разработке методов изготовления и анализа характеристик тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов, а также поиску путей оптимизации ее эффективности и долговечности. Следует отметить, что именно данная проблема в настоящее время сдерживает массовое распространение нейтронных источников такого типа. Перечисленные тезисы

подтверждают факт того, что тема диссертационной работы Е.О. Соколовой является важной и актуальной.

Рецензируемая диссертационная работа изложена на 127 страницах, состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 67 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 99 наименований.

Во введении автор раскрывает предмет диссертационной работы, отображает актуальность проводимых исследований, кратко приводит устоявшееся в научном сообществе положения касательно предмета диссертационной работы, описывая степень разработанности темы исследования. Автор обозначает цель и задачи исследования, указывает научную новизну, подробно описывает личный вклад и формулирует 5 основных положений, выносимых на защиту.

В первой главе приведена актуальная информация касательно предмета диссертации, а именно нейтроногенерирующей мишени для БНЗТ, проведен тщательный анализ требований, предъявляемых к мишеням, указаны существующие решения, отвечающие этим требованиям.

Следующие три главы являются основными, объединенные одним предметом, каждая из них является отдельным законченным исследованием.

Во второй главе исследуется влияние радиационного блистеринга медной подложки на эксплуатацию литиевой нейтроногенерирующей мишени. При чем эксперименты проводились настолько детально и последовательно, что в диссертационной работе изложены в виде отдельных четырех серий. Стоит отметить, что проводимые исследования являются логичным продолжением предыдущих работ, проводимых командой БНЗТ в ИЯФ СО РАН в том числе при непосредственном участии автора.

В третьей главе описана люминесценция поверхности литиевой мишени при попадании протонного пучка, на основе которой предложен нестандартный метод диагностики протонного пучка ускорителя. Также в главе приведены результаты реализации предложенного метода на ускорительном источнике нейтронов в ИЯФ СО РАН, акцентировано внимание на преимуществах этого метода.

В четвертой главе приводится описание предложенного метода *in situ* измерения толщины литиевого слоя на поверхности нейтроногенерирующей мишени, обоснована актуальность этого метода ввиду особенностей литиевой мишени. Измерение толщины слоя лития предложенным методом не разрушает мишень, так как основано на регистрации фотонов, генерируемых при попадании протонного пучка на литиевую мишень.

Новизна подхода и основные результаты:

Научная новизна и значимость полученных автором результатов заключается в оригинальности предложений по конструкции нейтроногенерирующей мишени и убедительной демонстрации их эффективности.

Впервые предложено использовать мишень, представляющую собой тонкий слой лития, нанесенный на медную охлаждаемую подложку. Было определено оптимальное, ранее никем не использованное, соотношение толщины литиевого слоя и характерных длин замедления быстрых протонов в литии и меди. В работе опровергнуто общепринятое заблуждение об ограничении ресурса мишени процессами блистеринга. На тандемном ускорителе ИЯФ СО РАН продемонстрировано, что блистеринг медной подложки оптимизированной тонкой литиевой мишени не снижает эффективности генерации нейтронов. Фактически в работе решена проблема разработки эффективной и долговечной мишени для генерации нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ с интенсивностью потока, достаточной для БНЗТ.

Впервые предложена и реализована методика *in situ* измерения распределения толщины литиевого слоя в плоскости мишени за счет регистрации и анализа люминесценции лития при его облучении протонным пучком. Методика принципиально важна для изготовления именно оптимизированных мишенных структур. На основе исследованных эффектов также была предложена методика контроля положения протонного пучка на мишени.

Все оригинальные физические и конструкторские решения и методики, предложенные автором, прошли успешную экспериментальную апробацию, что также подробно описано в диссертационной работе.

Достоверность полученных результатов:

Исследования характеристик тонкой литиевой мишени проведены с использованием целого ряда экспериментальных методик, а их объем весьма значителен. Работы, выполненные с использованием различных (в некоторых случаях дублирующих друг друга) методов диагностики, сравнение их результатов с существующими аналогами и теоретическими расчетами, широкое обсуждение полученных данных на специализированных международных конференциях, публикации в ведущих научных журналах не вызывают сомнения в обоснованности и достоверности научных положений и выводов. Проведенные исследования позволили предложить и разработать надежную и долговечную нейтроногенерирующую мишень,

оптимизированную для применения в области бор-нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний, прототипы которой уже реализованы и испытаны.

Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 5 научных статьях в международных высокорейтинговых журналах (в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России), зарегистрирован патент на изобретение.

Практическая значимость полученных автором результатов:

Практическая значимость диссертации не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы уже используются при разработке и изготовлении ключевых узлов нейтронных источников медицинского назначения и, несомненно, востребованы в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики ускорителей заряженных частиц, нейтронной физики.

Содержание диссертации и ее завершенность:

Работа выстроена логично, ее структура и содержание отражают цели и задачи исследования. Диссертация представляется законченным научным трудом, отличающимся подробным изучением режимов работы предложенной мишени и разработкой методик ее изготовления и контроля характеристик. Результаты Е.О. Соколовой, изложенные в диссертации, являются, безусловно, новыми и обладают большой научной значимостью, превосходят мировой уровень исследований в области разработки литиевых мишеней для генерации интенсивных нейтронных потоков.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в области исследования «Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий пучков заряженных частиц с электромагнитными полями, друг с другом, с молекулами остаточного газа и мишенями» (п. 7 паспорта специальности).

Замечания и пожелания:

Значимых замечаний к диссертационной работе нет. Ниже приведен ряд уточняющих вопросов и предложений по корректировке некоторых формулировок.

1. В пятом положении, выносимом на защиту, используется формулировка «Тонкая литиевая мишень, стойкая к радиационному блистерингу...». Возможно, лучше использовать термин «нечувствительная» вместо «стойкая»,

так как блистерингу мишень все-таки подвержена, но это не влияет на ее эффективность.

2. На страницах 12-13 сформулированы требования к оптимальной мишени. В четвертом пункте указано, что подложка, на которую напыляется литий, должна быть тонкой, чтобы сократить расстояние до замедлителя. Учитывая, что толщина этой подложки в любом случае много меньше размеров замедлителя, данное требование выглядит излишним.
3. В разделе 1.3 диссертации приводятся подробные характеристики литиевой мишени, используемой в ИЯФ СО РАН, включая все размеры, расходы и скорости охлаждающей жидкости. Здесь было бы хорошо указать предельные тепловые нагрузки и соответствующие значения тока и энергии протонного пучка, ожидаемый нейтронный выход, которые могли быть реализованы на разработанной мишени в случае повышения доступного тока пучка ускорителя. Данные желательно подтвердить результатами расчета тепловых нагрузок.
4. Предыдущее замечание можно переформулировать в виде вопроса: «Есть ли у разработанной мишени возможности по дальнейшему увеличению нейтронного выхода и до какого уровня?»
5. В разделе 2.2.1 делается утверждение о том, что разработанная мишень позволит проводить терапию для 340 пациентов. Не понятно, как определено это число, ведь деградация мишени в эксперименте не наблюдалась. Как корректно определить ресурс мишени?
6. В первом абзаце раздела 4.4 сказано, что измерения проведены для трех мишеней, с толщиной 200, 68 и 7,4 мкм. Утверждение является неудачным, так как измерения проведены и результаты представлены только для двух тонких мишеней, а мишень с толщиной 200 мкм является толстой для разработанного автором диагностического метода. Надо отметить, что это отмечает и автор в нижеследующем тексте.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации. Замечаний к автореферату нет.

Заключение оппонента по диссертации Е.О. Соколовой на соискание ученой степени кандидата наук:

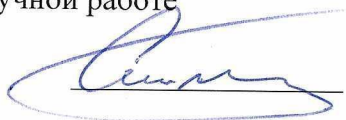
Диссертация Соколовой Евгении Олеговны «Исследование и оптимизация тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с разработкой источников нейтронов на основе ускорителей заряженных частиц и их применения для терапии онкологических заболеваний методами БНЗТ.

Диссертационная работа Е.О. Соколовой «Исследование и оптимизация тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов» 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.

Я, Скалыга Вадим Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Соколовой Евгении Олеговны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Скалыга Вадим Александрович
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
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук»
Заместитель директора по научной работе

«09» ноября 2022 г.



В.А. Скалыга

Подпись В.А. Скалыги заверяю
Ученый секретарь ИПФ РАН



И.В. Корюкин