

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Дубна, Московская область, Россия 141980 Dubna Moscow Region Russia 141980  
Telefax: (7-495) 632-78-80 Tel.: (7-49621) 65-059 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор Международной  
межправительственной организации

«Объединенный институт ядерных исследований»  
д.ф.-м.н., академик РАН, профессор,



 Г.В. Трубников

«04» ноября 2022 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертацию

**Соколовой Евгении Олеговны**

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

представленную на соискание ученой степени кандидата физико -  
математических наук по специальности 1.3.18 «Физика пучков заряженных  
частиц и ускорительная техника»

**Актуальность темы диссертации**

Работа посвящена оптимизации нейтрон-производящей мишени для использования в установке для бор-нейтрон захватной терапии (БНЗТ). Суть метода заключается в селективном насыщении клеток опухоли борсодержащими препаратами (с бором, обогащенным изотопом  $^{10}\text{B}$ , которого в естественном боре 19,9%) и последующем облучении нейтронами с целью индуцировать ядерную реакцию  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ , в результате которой

образуются два ядра – альфа частица и ядро лития, обладающие суммарным пробегом в тканях человеческого тела около 10  $\mu\text{m}$  и кинетической энергией чуть менее 3 МэВ, что гарантированно приводит к гибели клетки, в которой произошел захват нейтрона.

Первое предложение об использовании нейтронного излучения в терапевтических целях было сделано всего через 4 года после открытия нейтрона в 1936 году. В этой работе впервые было указано на возможности использования легких элементов с большими сечениями захвата тепловых нейтронов, например, бора, которые могли бы доставляться в поврежденные органы, индуцированный распад которых вызывал бы необходимый эффект.

В 1951 году были сделаны первые попытки использовать бор-захватную терапию для лечения раковых больных с использованием нейтронов ядерного реактора. После этого в США был предпринят ряд попыток лечения с использованием НЗТ, однако серьезные побочные эффекты не позволили развить далее эту практику и в 1961 году эти попытки в Штатах были остановлены. Еще десять-пятнадцать лет назад применение НЗТ ограничивалось специализированными установками на выведенных пучках ядерных реакторов. К настоящему времени в клиниках разных стран функционируют несколько установок на базе ускорителей, при этом полное количество пациентов, получивших лечение на всех этих установках крайне мало и несравнимо с количеством пациентов, получивших лечение на установках со ставшей уже традиционной протонной терапией.

Создание компактной эффективной установки для БНЗТ, которая могла бы быть размещена в любой онкологической клинике, существенно расширило бы применение данного весьма эффективного метода лечения и спасло бы жизни сотен и тысяч пациентов. Именно на решение этой задачи и направлено исследование, представленное в данной диссертации – изучение эффекта радиационного блистеринга меди при имплантации протонов и его влияние на выход нейтронов.

## **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа Е.О. Соколовой состоит из введения, четырех глав и заключения, в конце диссертации приведен список цитируемой литературы, содержащий 100 источников, размещенный на 12 страницах. Общий объем работы 126 страниц, она содержит 67 рисунков и три таблицы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель работы, поставлены задачи, которые необходимо было решить для достижения поставленной цели, аргументирована научная новизна и значимость исследований, определен личный вклад автора и представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации описаны требования к нейтронопроизводящей литиевой мишени для БНЗТ, дан подробный обзор, существующих и находящихся в процессе создания ускорительных установок с литиевыми мишенями для целей БНЗТ. В заключении первой главы описана конструкция и принципы работы тонкой литиевой нейтрон-производящей мишени ускорительного источника тепловых нейтронов ИЯФ СО РАН.

Во второй главе диссертационной работы приведены результаты исследований радиационного блистеринга меди под поверхностью напыленной тонкой литиевой мишени при облучении протонами с энергией 2,5 МэВ и его влияния на выход нейтронов. Подробно изложено описание четырех серий экспериментов с использованием оригинальных методик и аппаратуры. Сделано заключение о том, что процесс образования медных блистеров на «свежей» мишени завершается по достижении определенного флюенса протонов, образовавшиеся блистеры заполняются литием, что приводит к эффективному уменьшению плотности ядер лития в подпороговом слое мишени и соответствующему снижению выхода нейтронов. Однако это снижение выхода не превышает величины 20 процентов от первоначального, а вот процесс блистерообразования при этом прекращается. На основе этого автор делает вывод, кардинально меняющий

существующее до настоящего времени представление о том, что именно радиационный блистеринг меди ограничивает срок службы литиевой мишени. Результаты исследований были подтверждены экспериментально при облучении разработанной мишени в течение месяца по восемь часов в день.

В главе три описаны исследования неизвестного ранее эффекта люминесценции поверхности литиевой мишени при облучении протонами, предложен и реализован метод измерения и контроля положения и размера пучка протонов на поверхности литиевой мишени на основе этого эффекта.

В главе четыре описана реализация метода *in situ* измерения толщины слоя лития в процессе работы под пучком протонов. Метод основан на регистрации выхода  $\gamma$ -квантов с энергией 478 кэВ из реакции  ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$  и позволяет получать пространственную картину распределения лития по поверхности мишени и мониторировать состояние мишенного слоя в процессе облучения.

В заключении сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту:

1. Установлено, что радиационный блистеринг меди при имплантации протонов не влияет на выход нейтронов в пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  из литиевого слоя, нанесенного на медь.
2. Установлено, что водород, имплантированный в медь при облучении литиевой мишени протонами, не вступает в химическое соединение с литием, что могло бы приводить к уменьшению выхода нейтронов из литиевой мишени.
3. Зарегистрирована люминесценция поверхности литиевой мишени и измерен ее спектр при облучении литиевой мишени высокоэнергетичными протонами.
4. Разработана и внедрена диагностика на основе эффекта люминесценции поверхности литиевой мишени, которая позволяет измерять и

контролировать положение и размер пучка протонов на поверхности литиевой мишени.

5. Разработан и внедрен метод *in situ* измерения толщины слоя лития, основанный на сравнении интенсивности излучения фотонов в реакции  ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$  из исследуемого литиевого слоя и из толстого при их облучении протонами. Метод позволяет измерить толщину лития вплоть до 100 мкм при энергии протонов 1,8 МэВ.

#### **Соответствие темы и содержания диссертации заявленной специальности**

Содержание диссертации, её завершенность в целом соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК. Тема исследования соответствует заявленной научной специальности.

#### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК, правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

#### **Личный вклад соискателя в получение результатов исследования**

Личный вклад Соколовой Е.О. в результаты работ, представленных в диссертации, является определяющим и заключается в постановке задачи, в проведении расчетов и численного моделирования, проведении экспериментов, обработки и анализа экспериментальных данных. Автором выполнены экспериментальные исследования по изучению влияния радиационного блистеринга меди на выход нейтронов из литиевого слоя, нанесенного на медь. Автор лично производил напыление литиевого слоя требуемой толщины на исследуемые образцы, проводил исследование образцов на сканирующем профилометре с конфокальными хроматическими сенсорами, готовил образцы и исследовал их микроструктуру на растровом электронном микроскопе. При ключевом участии автора исследована

люминесценция поверхности литиевой мишени под действием протонов и разработана методика измерения положения и размера пучка протонов на поверхности литиевой мишени. Автором предложен и реализован оригинальный *in situ* метод неразрушающего измерения толщины лития. Автором модифицирована система напыления лития для получения однородного по толщине литиевого слоя. Автором написаны соответствующие разделы в опубликованных статьях.

### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность полученных в работе результатов основана на тщательности экспериментальных исследований и использовании в каждом эксперименте целого ряда дополняющих друг друга методик. Окончательным доказательством правильности сделанных в работе выводов является экспериментальное облучение мишени в течение месяца с контролем размеров и толщины литиевого слоя на поверхности медной подложки, а также выхода нейтронов из мишени.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Результаты, полученные в части влияния радиационного блистеринга меди на свойства литиевой нейтрон-производящей мишени можно смело назвать «революционными». Они меняют сложившееся отношение к нейтрон-производящим литиевым мишеням, в которых литий напылен на медную подложку, как к недолговечным мишеням из-за радиационного блистеринга. Внедрение таких мишеней в комплексе с компактными ускорителями протонов позволит существенно увеличить парк установок для БНЗТ и в перспективе, внедрить их в каждую онкологическую клинику.

## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты работ, вошедших в состав диссертации, безусловно, нуждаются в освоении широким кругом специалистов, работающих над созданием компактных источников нейтронов, не только для БНЗТ, но и для физических исследований в области ядерной физики и физики конденсированных сред. Эти результаты могут быть использованы во всех нейтронных центрах России и мира.

### **Новизна и научная ценность полученных результатов**

Главный результат работы – «реабилитация» напыленных литиевых нейтронопроизводящих мишеней как надежных и долговечных компонентов компактных источников нейтронов. Методы контроля размеров и толщины мишени, разработанные в данной диссертации, также не применялись ранее.

### **Замечания по диссертационной работе**

На заседании Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общеинститутского семинара при обсуждении доклада соискателя докладчику были заданы вопросы и высказаны конкретные замечания по теме диссертации.

По заданным вопросам и высказанным замечаниям диссертант дал обстоятельный ответ. В целом критические замечания не уменьшают значение работы, как диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

### **Заключение по диссертации о соответствии её требованиям**

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную автором на высоком научном уровне. Представленные в работе результаты исследований достоверны, выводы, заключения и рекомендации аргументированы и обоснованы. Результаты работы опубликованы, апробированы и внедрены. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

По результатам диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых журналах и сборниках трудов конференций, 5 из которых в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК.

Диссертация Соколовой Евгении Олеговны «Исследование и оптимизация тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а её автор, Соколова Евгения Олеговна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв составили:

Директор Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ  
к.ф.м.н. специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Швецов Валерий Николаевич  
e-mail: [shv@nf.jinr.ru](mailto:shv@nf.jinr.ru) , тел. 8-496-21-659-25

Подпись \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Начальник Научно – экспериментального отдела  
ускорительных систем Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ,  
к.ф.–м.н., д.т.н. специальность 1.3.18 (01.04.20)  
- «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Сумбаев Анатолий Павлович  
e-mail: [sumbaev@nf.jinr.ru](mailto:sumbaev@nf.jinr.ru) , тел. 8-496-21-650-71

Подпись \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_



Материалы диссертации Соколовой Е.О. «Исследование и оптимизация тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов», а также отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на заседании Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общеинститутского семинара Международной межправительственной организации «Объединённый институт ядерных исследований ОИЯИ» 18 июля 2022 г. (протокол заседания №86).


Председатель Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общеинститутского семинара ОИЯИ,  
специальный представитель директора Института по сотрудничеству с международными и российскими научными организациями  
академик РАН, доктор ф.-м. наук, специальность 1.3.18 (01.04.20)  
– Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника  
Шарков Борис Юрьевич  
e-mail: [sharkov@jinr.ru](mailto:sharkov@jinr.ru) , тел. 496-21-650-60

Подпись 

Дата 07.11.2022 г.

Подпись Шаркова Б.Ю. заверяю:  
главный учёный секретарь ОИЯИ,  
кандидат физико – математических наук  
Неделько Сергей Николаевич

Почтовый адрес:  
Московская область, г. Дубна ул. Жолио-Кюри, 6.  
Тел. 496-21-65940, 496-21-62221.  
e-mail [main@jinr.ru](mailto:main@jinr.ru)

Подпись 

Дата 07.11.2022 г.