

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Касатова Дмитрия Александровича «**Исследование материалов нейтроногенерирующей мишени для борнейтронозахватной терапии**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время онкологические заболевания занимают 2 место в мире по смертности, следуя за сердечно-сосудистыми заболеваниями. Перспективным методом лечения злокачественных опухолей является борнейтронозахватная терапия. Развитие ускорительной техники позволяет создать компактные источники нейтронов на их основе. Однако широкое внедрение этого метода лечения онкологических заболеваний в клиническую практику сдерживается, в том числе, отсутствием нейтроногенерирующих мишеней с высокой дозой терапевтических нейтронов и низкой дозой других нежелательных излучений таких, как высокоэнергетические нейтроны, или гамма-излучение. Актуальность данной работы определяется необходимостью создания нейтроногенерирующей мишени, удовлетворяющей этим требованиям, и получения пучка нейтронов терапевтического качества.

### **Структура и содержание работы**

В **первой главе** достаточно подробно описаны основы борнейтронозахватной терапии, существующие международные центры, многие из которых автор посетил с научными командировками, а также различные конструкции нейтроногенерирующих мишеней, которые используются в различных научных центрах в настоящее время. На основании обзора сформулированы требования, предъявляемые к нейтроногенерирующими мишеням.

Во **второй главе** приводятся экспериментальные данные по генерации сопутствующего гамма-излучения при взаимодействию протонов с энергией 2 МэВ с литием и с конструкционными материалами. В частности, приводится оценка измеренной мощности дозы сопутствующего гамма-излучения, нейтронного излучения и наведенной активности. Определена минимальная толщина литиевой мишени, при которой существенно снижается выход нежелательного гамма-излучения при сохранении выхода нейтронов.

Установлено, что нержавеющая сталь, титан и ванадий являются неподходящими конструкционными материалами для нейтроногенерирующих мишеней, т.к. испускают нежелательные быстрые нейтроны при поглощении протонов. Наиболее подходящими материалами для изготовления подложки для тонкой литиевой мишени являются алюминий, медь, молибден и tantal, которые позволяют уменьшить мощность дозы нежелательного гамма-излучения без уменьшения потока нейtronов.

Далее приводятся результаты измерения сечения реакции  $^7\text{Li}(\text{p},\text{p}'\gamma)^7\text{Li}$  и выхода гамма-квантов из толстой литиевой мишени, а также их сравнение с имеющимися литературными данными.

Определено как уменьшается выход нежелательного гамма-излучения от тонкой литиевой мишени в зависимости от энергии протонов и материала подложки мишени.

**В третьей главе** дается литературный обзор по радиационному блистерингу различных металлов, а также экспериментальные результаты, полученные автором, по блистерингу высокочистой меди, а также меди, покрытой фольгой tantalа, или смеси порошков tantalа и меди. Изучено влияние потока протонов, зернистости меди и ее чистоты на размер и концентрацию блистеров. Изучено влияние текстуры в меди на процесс образования блистеров. Показано, что при уменьшении размера зерна меди и повышении ее чистоты образование блистеров существенно уменьшается, при этом устойчивость к образованию блистеров больше зависит от чистоты меди, чем от ее зернистости. Установлено, что нанесение тонкого слоя tantalа на медь повышает ее устойчивость к блистерингу примерно в 10 раз, однако наличие tantalового слоя в мишени ведет к ее нагреву до критических температур за счет поглощения протонов в этом слое.

**В четвертой главе** приводятся результаты по отработке методики БНЗТ на клеточных культурах и лабораторных животных, используя разработанную литиевую мишень. Предложен способ определения дозы облучения за счет измерения интенсивности излучения линий изотопов натрия, марганца, хлора и калия, образующихся в результате активации этих элементов нейtronами. На этот метод получен патент РФ.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Содержание диссертации полностью соответствует ее теме. Экспериментальная работа выполнена на высоком техническом уровне, с использованием статистических методов анализа достоверности

полученных данных. Также достоверность полученных результатов подтверждена их опубликованием в ряде научных статей, в том числе в рецензируемых высокорейтинговых научных журналах. Выводы диссертации отвечают на поставленную в работе цель и соответствующие задачи и, тем самым, подтверждают, что цель диссертационной работы достигнута. Представленные положения и выводы четко сформулированы и хорошо обоснованы проведенными экспериментальными исследованиями. Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации и содержание публикаций по теме диссертации.

### **Научная новизна результатов**

1. Измерена мощность дозы и спектр рентгеновского и гамма-излучения, мощность дозы нейтронного излучения и спектр излучения остаточной активности при поглощении протонов с энергией 2 МэВ в графите, алюминии, титане, ванадии, нержавеющей стали, меди, молибдене и tantalе.
2. С высокой точностью измерено сечение реакции неупругого рассеяния протона на атомном ядре лития  ${}^7\text{Li}(\text{p},\text{p}'\gamma){}^7\text{Li}$  при энергии протонов от 0,64 до 2,1 МэВ.
3. Впервые измерена зависимость выхода 478 кэВ фотонов из толстой литиевой мишени от энергии протонов в диапазоне энергий от 0,65 до 2,225 МэВ.

**Практическая и научная значимость полученных в диссертации результатов** заключается в том, что они использованы при изготовлении источника нейtronов для Neuboron Xiamen центра БНЗТ (г. Сямынь, провинция Фуцзянь, Китай), а также могут быть использованы при разработке нейтроногенерирующих мишеней других ускорительных источников нейтронов. Полученные результаты могут использоваться для разработки и проведения БНЗТ в условиях клиник.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Считаю, что следует избегать англиканизмов и, по возможности, использовать русскую терминологию. Если же это не удобно, то необходимо обозначить используемую терминологию, например, что такое «блестер» и «блестеринг».

2. На стр. 5 п.2 **Задачи** сформулирован не лучшим образом. Вместо « ... провести наблюдение за процессом образования радиационных повреждений...», следовало поставить задачу « ... исследовать процесс образования...».
3. п.3 сформулирован крайне лаконично: «Измерить спектр активированной мишени». Следовало указать спектр чего.
4. В разделе **Научная новизна** (стр. 5) написано: «Измерена мощность дозы и спектры...», однако не четко сформулировано в чем новизна: впервые измерены эти величины, или впервые измерены эти величины для указанных элементов: графит, алюминий и т.д.
5. Там же далее написано: «С высокой точностью измерено сечение реакции неупругого рассеяния протона на атомном ядре лития...». Следовало указать насколько повысили точность измерений.
6. На стр. 6 в качестве **Научной новизны** написано «применением CCD-камеры и удаленного микроскопа для наблюдения динамики образования блистеров». Это не является научным результатом, но техническим, хотя это и осуществлено впервые.
7. Далее написано: «С применением рентгеновского дифрактометра .... Проведено исследование поверхности облученных образцов.» Следовало указать что было исследовано: фазовый состав, микроструктура: размер области когерентного рассеяния или текстура.
8. На стр. 7 п.vi) написано: «... выход 478 кэВ...» – пропущено слово «фотонов».

Перечисленные замечания не затрагивают выводов и результатов работы, не снижают ее значимости, общей высокой оценки работы и квалификации автора.

Диссертационная работа Касатова Дмитрия Александровича **«Исследование материалов нейтроногенерирующей мишени для бор-нейтронозахватной терапии»** выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, имеет высокую научную новизну и практическую значимость и полностью соответствует требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (в частности, п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней»),

предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Касатов Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Матвеев Андрей Трофимович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Касатова Дмитрия Александровича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент: Матвеев Андрей Трофимович – кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), старший научный сотрудник лаборатории «Неорганические наноматериалы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1  
e-mail: matveev.at@misis.ru  
тел.: +7(495) 638 44 47; +7(977) 907 69 85

«18» марта 2022 г.



А.Т. Матвеев

Подпись Матвеева А.Т. заверяю:

Проректор по науке и инновациям  
НИТУ «МИСиС»

М.Р. Филонов

