

## Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Сыресина Евгения Михайловича на диссертацию Таскаева Сергея Юрьевича "Ускорительный источник эпитепловых нейтронов", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики".

### Актуальность

В России в настоящее время зарегистрировано более 2,3 млн. онкологических больных и ежегодно появляется более 500 тысяч новых больных. По смертности раковые заболевания находятся на втором месте после сердечно-сосудистых заболеваний. Одним из ключевых направлений лечения онкологических заболеваний является радиационная медицина. В качестве перспективного метода лечения в рамках радиационной медицины рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), реализуемая благодаря способности ядра бора селективно накапливаться в раковых клетках и поглощать тепловые нейтроны, выделяя энергию в ходе ядерной реакции, именно, в этих клетках.

Первые испытания бор нейтронозахватной терапии были проведены в начале 50-х годов прошлого века на ядерных реакторах. В последние два десятилетия исследования по БНЗТ ведутся преимущественно с использованием ускорителей, предназначенных для формирования эпитепловых нейтронов. В 1998 году в ИЯФ СО РАН был предложен проект ускорительного источника нейтронов для нейтронозахватной терапии.

### Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выносимые на защиту, выводы, сделанные в конце каждого параграфа, рекомендации к реализации БНЗТ и дальнейшему развитию как нейтроногенерирующей мишени, так и ускорительных систем, научно обоснованы. В основе положений, выводов и рекомендаций лежат экспериментальные результаты, численные расчеты и действующий прототип источника эпитепловых нейтронов для клинического применения БНЗТ.

### Достоверность результатов

Отметим, как положительный факт, что экспериментальные результаты в диссертации С.Ю. Таскаева, как правило, повторяются несколькими различными методами и приводятся в сравнении с теоретическими и численными моделями. Результаты диссертационной работы С.Ю. Таскаева широко известны научной общественности, докладывались на семинарах в ИЯФ СО РАН, МИФИ, университете Осака, компании ИВА, на международных и российских конференциях (41 доклад) и опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах (30 статей).

### Научная новизна

Все научные результаты, выносимые на защиту, являются новыми. Основным новым результатом работы является разработка ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и проведение на нём экспериментальных исследований с литиевой нейтроногенерирующей мишенью. На ускорителе-тендеме впервые получен протонный пучок с энергией 2 МэВ и током 1,6 мА. Автор диссертации впервые определена концепция нейтроногенерирующей мишени в режиме припороговой генерации нейтронов в реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  и впервые была создана такая технологическая мишень. С целью дальнейшего

развития ускорительной техники для БНЗТ впервые предложена система формирования ортогонального нейтронного пучка, позволяющая проводить облучение пациентов с любого направления.

### **Личный вклад**

Из приведенного в диссертации списка литературы и примечаний следует, что представленные к защите результаты диссертации получены лично автором или при его определяющем участии.

При определяющем участии автора диссертации получены основные результаты на электростатическом ускорителе-тандеме. С.Ю. Таскаевым предложена концепция нейтроногенерирующей мишени. При его определяющем участии была создана такая мишень и проведены исследования на ней, в частности, напыление литиевого слоя, обеспечение теплосъема при нагреве мишени 25 кВт протонным пучком, выбор радиационно стойкого материала подложки и др.

Таскаевым С.Ю. предложена и реализована программа исследований по реализации БНЗТ для биологических объектов, им выдвинута концепция нового медицинского ускорителя для БНЗТ с системой ортогонального формирования пучка нейтронов.

### **Научно-практическая ценность**

Для клинической реализации БНЗТ требуются пучки нейтронов с интенсивностью  $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и узким энергетическим распределением в районе 10 кэВ. Для обеспечения таких параметров нейтронных потоков создаются высокотехнологичные ускорители протонных пучков с энергией 2,5 МэВ и током 5-10 мА. Создание ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на энергию 2 МэВ и ток 1,6 мА является заметным вкладом в направлении прототипирования ускорителя для клинических исследований.

Реализация нейтроногенерирующей литиевой мишени позволило отработать основные технологические аспекты для клинического использования такой мишени.

### **Рекомендации по использованию результатов**

Результаты диссертации могут быть использованы в разрабатываемых ускорительных системах для БНЗТ, прежде всего, в ИЯФ СО РАН, ФЭИ, НИИЭФА и ряде зарубежных центров, таких как ИВА (Бельгия), университет Нагоя (Япония), Национальный онкологический центр в Токио (Япония) и др.

Реализация проекта, в первую очередь, направлена на проведение медико-биологических исследований по изучению влияния эпитепловых нейтронов на жизнеспособность опухолевых клеток человека. В качестве второго этапа после увеличения интенсивности протонного пучка до уровня 5-10 мА в предложенном автором модифицированном ускорителе могут быть проведены клинические испытания при лечении онкологических заболеваний у пациентов. Разработанные автором диссертации технологии нейтроногенерирующей мишени уже нашли широкое применение в ряде зарубежных центров, таких как ИВА, Sumitomo Heavy Industries Ltd., Hitachi и др.

## Описание содержания диссертации по главам

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во введении дано краткое обоснование актуальности проблем, затрагиваемых в диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена ускорителям заряженных частиц для БНЗТ. Здесь приведен обзор ускорительных комплексов за последние 20 лет. Основное внимание в первой главе уделено ускорителю-тандему с вакуумной изоляцией, предназначенного для припороговой генерации нейтронов в реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Особенностью ускорителя является большая энергия, запасенная в вакуумных зазорах и быстрый темп ускорения, что приводит к ряду проблем: высоковольтной прочности зазоров и инжекции пучка в ускоритель, прежде всего, связанной с большой силой входной линзы. Найденные в диссертации решения позволили получить протонный пучок с током 1,6 мА и энергией 2 МэВ.

Вторая глава посвящена нейтроногенерирующей мишени и основным требованиям для ее реализаций: тонкого слоя чистого лития, находящегося в твердом состоянии при его нагреве протонным пучком; радиационной стойкой тонкой подложки, охлаждаемой водой. Создание мишени потребовало от автора решения целого ряда технологических проблем, связанных с взаимодействием протонного пучка с материалом мишени и подложки, теплогидравликой, оптимизацией выхода эпитепловых нейтронов из мишени. Все эти проблемы автором диссертации были успешно решены и в настоящее время отработана технология нейтроногенерирующей мишени, предназначенной для клинических комплексов БНЗТ. В заключительном параграфе главы 2 приведено описание конструкции разработанной мишени.

В главе 3 обсуждаются две новые схемы формирования пучка для БНЗТ на основе припорогового режима генерации нейтронов. Наиболее привлекательная схема связана с формированием терапевтического пучка нейтронов в ортогональном направлении по отношению к протонному пучку, что позволяет проводить облучение пациента с разных сторон.

В главе 4 описана генерация нейтронов и результаты измерения спектра с помощью время-пролетной методики. Автором здесь применено оригинальное решение, связанное с генерацией коротких импульсов излучения при подаче импульсов напряжения на мишень, приводящих энергию протонного пучка с допороговой величины на надпороговое значение.

Глава 5 посвящена радиобиологическим исследованиям с выведенным потоком эпитепловых нейтронов. Исследования наглядно продемонстрировали избирательное уничтожение клеток опухоли.

Далее в главе обсуждается новый способ формирования пучка нейтронов на основе ортогональной по отношению к пучку протонов схеме вывода нейтронов и интегрированной внутрь ускорителя высоковольтной системы питания.

Также в этой главе представлены приложения ускорителя для поиска взрывчатых и наркотических веществ, а также в качестве генератора  $\alpha$ -частиц.

В заключении приведены основные результаты работы.

## Замечания

1. В рамках реализации проектных работ на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией было намерение получить ток протонного пучка 5 мА, в ходе экспериментальных исследований стабильная работа ускорителя была реализована только при токе 1,6 мА.
2. Предложена новая схема формирования пучка с током до 10 мА на основе замены источника  $H^-$ , модификации области входа  $H^-$  в ускоритель, модификации изоляторов ускорительной трубки. Однако, к настоящему моменту все предложенные усовершенствования еще не опробованы экспериментально даже отдельно.

Сделанные замечания не снижают ценности диссертационной работы.

## Заключение

Полученные диссертантом результаты соответствуют мировому уровню, достигнутому в других исследовательских центрах, где осуществляется разработка БНЗТ. На основании выполненных автором экспериментальных исследований был создан источник эпитепловых нейтронов для реализации первых экспериментов по БНЗТ и наглядно продемонстрировано избирательное уничтожение клеток опухоли такими нейтронами.

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие ее квалифицировать как новое научное достижение, имеющее важное фундаментальное и социально-экономическое значение.

Диссертация С.Ю. Таскаева отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики".

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Официальный оппонент

профессор, доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

Лаборатории ядерных проблем им. Джелепова

Объединенного института ядерных исследований

Сыресин Евгений Михайлович

Почтовый рабочий адрес: 141980 Московская обл., г. Дубна

ул. Жолио Кюри, д. 6

Рабочий телефон: 8 (49621) 65321

Электронный адрес: syresin@nusun.jinr.ru

Подпись Е.М. Сыресина удостоверяю

Ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ,

кандидат физ.-мат. наук



И.В. Титкова  
29 октября 2014 г.