



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*  
Г.В. Трубников

*09 мая 2022*  
\_\_\_\_\_ 2022 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертацию

**Колесникова Ярослава Александровича**  
**«Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе - тандеме с вакуумной изоляцией»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико -  
математических наук по специальности 1.3.18 «Физика пучков заряженных  
частиц и ускорительная техника».

**Актуальность темы диссертации**

Диссертация Я.А. Колесникова ««Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе - тандеме с вакуумной изоляцией»» посвящена решению проблемы разработки и внедрения в практику надёжных и удобных в эксплуатации ускорительных установок, предназначенных для генерации пучков заряженных частиц, производящих потоки нейтронов, используемых в методике бор – нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей (БНЗ–терапии, БНЗТ). Отличительной

особенностью БНЗТ является специфическая избирательность воздействия нейтронов на клетки опухолей с накопленным в них ядрами изотопа бор-10, путём возбуждения ядерной реакции с выделением энергии, достаточной для разрушения клетки опухоли. Несмотря на обнадеживающие результаты, полученные в применении БНЗТ в экспериментальном порядке, на практике методика БНЗТ пока ещё не получила широкого и повсеместного распространения в силу того, что традиционно используемые в качестве источников нейтронов установки на базе атомных реакторов деления не обладают набором эксплуатационных характеристик, необходимых для систематической работы в общедоступных клиниках онкологического профиля. Выбор для использования в заданных целях традиционных ускорительных установок, их адаптация, а также создание и развитие новых ускорителей, специализированных под задачи БНЗТ, в терапии онкологических заболеваний является задачей первостепенного порядка.

Диссертационная работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск,) в котором в течение нескольких десятков лет накоплен значительный опыт разработки и создания ускорителей заряженных частиц с параметрами пучков, пригодными для производства потоков нейтронов в качестве вторичных пучков при взаимодействии первичных пучков с мишенью. Целью диссертационной работы Я.А. Колесникова является изучение и оптимизация возможностей тандем – ускорителя с вакуумной изоляцией, предложенного и разработанного в ИЯФ СО РАН, для генерации потоков тепловых нейтронов с плотностью потока до  $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и обеспечение режимов длительного и стабильного производства пучков протонов и дейтронов в широком диапазоне энергий и интенсивности. Основные задачи соискателя в свете поставленных целей состояли:

1. В разработке эффективных средств диагностики пучков, позволяющих производить измерения параметров пучков тандем - ускорителя как в режиме «beam break up» (т.е. деструктивных средств), так и в режиме мониторинга ускоряемых пучков (т.е. средств, не разрушающих пучок).
2. В поиске и оптимизации режимов ускорения и транспортировки пучков тандем – ускорителя с вакуумной изоляцией для формирования на мишени пучков протонов или дейтронов с требуемыми стабильными параметрами.

## Оценка структуры и содержания работы

Диссертация Я.А. Колесникова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы 149 страниц, из них 132 страницы текста и 17 страниц – список цитируемой литературы.

Во введении представлено существо и современное состояние исследуемых вопросов, обосновывается их актуальность, определены цель работы и круг задач, подлежащих решению для достижения поставленной цели. Во введении также сформулированы положения, представленные к защите:

1. Инжекция пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией сопровождается действием пространственного заряда и для оптимального ускорения ионов при изменении тока требуется корректировка силы фокусирующей линзы.
2. Пучок протонов, получаемый в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией, характеризуется диаметром 9 – 11 мм, угловой расходимостью до  $\pm 1,5$  мрад, нормализованным эмиттансом 0,2 мм мрад. Транспортировка пучка протонов на расстояние до 10 м не сопровождается заметным влиянием пространственного заряда.
3. Измерение потока сопутствующих атомов водорода обеспечивает оперативный контроль эффективности газовой обдирочной мишени.
4. Ток пучка ионов аргона, выходящего из газовой обдирочной мишени и сопутствующего пучку протонов, пренебрежимо мал.
5. Разработанные и внедренные диагностические средства обеспечивают стабильное и долговременное получение пучка протонов или дейтронов с энергией в диапазоне от 0,6 до 2,2 МэВ и с током в диапазоне от 0,5 до 3 мА.

В первой главе представлен обзор современных методов диагностики пучков заряженных частиц, проанализированы методы диагностики пучков, генерируемых тандем – ускорителем ИЯФ, выявлены их специфика, позитивные преимущества и недостатки, а также границы их применимости.

Во второй главе представлены схема, конструкция и характеристики тандем ускорителя с вакуумной изоляцией, разработанного и функционирующего в ИЯФ СО РАН. Отмечено ключевое преимущество концепции тандемного ускорения – повторное использование ускоряющей системы после

перезарядки частиц пучка, что позволяет снизить требования к электрической изоляции и, следовательно, уменьшает размер и стоимость ускорителя, а также специфические особенности электростатического ускорителя – непрерывный режим работы, высокий уровень плотности мощности пучка и стабильность его энергетических параметров.

Третья глава посвящена исследованию инжекции отрицательных ионов водорода в ускоритель. В главе описаны способы и устройства для измерения параметров пучка отрицательных ионов, представлены результаты оптимизации системы инжекции.

В четвёртой главе представлены результаты исследования по диагностике пучка ионов и сопутствующих потоков частиц в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией и исследований эффективности установленной внутри ускорителя газовой обдирочной мишени. Измерены параметры пучка ионов аргона, сопутствующего пучку ускоряемых протонов.

Пятая глава посвящена описанию предложенных и использованных методов и средств диагностики пучка протонов, ускоренных тандем – ускорителем ИЯФ. Специфическими особенностями пучков, выведенных из тандем – ускорителя, являются их мощность (до 6 кВт) и высокая плотность мощности в приосевой области ( $> 1 \text{ кВт/см}^2$ ). Ошибки в проводке пучка к мишени могут приводить к повреждениям средств диагностики и элементов тракта транспортировки, поэтому в конструкцию приборов диагностики закладываются либо принципы бесконтактной диагностики, либо в элементах приборов диагностики предусматриваются средства их охлаждения. Представлены около десятка средств диагностики позволяющих контролировать состояние ускорителя и параметров пучка протонов.

В заключении представлены итоги диссертационной работы, сформулированы её результаты.

Главные результаты работы

1. Разработан и применён на тандем - ускорителе с вакуумной изоляцией, разработанном и функционирующем в ИЯФ СО РАН, комплекс диагностических методик и средств (оптические, тепловые, индукционные и активационные) для измерения и контроля положения, размера и фазового объёма пучка ускоренных ионов.

2. Установлено, что инжекция пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель сопровождается действием пространственного заряда, и для оптимального ускорения ионов при изменении тока требуется корректировка силы фокусирующей линзы.
3. Измеренные параметры пучка протонов на выходе из ускорителя составляют: диаметр 9 – 11 мм, угловая расходимость до  $\pm 1,5$  мрад, нормализованный эмиттанс 0,2 мм мрад. При транспортировке пучка протонов от выхода из ускорителя до мишени заметного влияния пространственного заряда на качество транспортировки не установлено.
4. Измерение параметров потока атомов водорода, сопутствующих ускоренным пучкам позволяет обеспечивать оперативный контроль за эффективностью газовой обдирочной мишени.
5. Измеренный ток ионов аргона, сопутствующих протонам ускоренного пучка, пренебрежимо мал в той степени, в которой применения специальных мер подавления потоков ионов аргона не требуется.
6. Разработанные и внедрённые на ускорителе диагностические средства и результаты оптимизации систем ускорителя обеспечивают стабильное и долговременное получение пучков протонов или дейтронов с энергией, варьируемой от 0,6 до 2,2 МэВ, с током от 0,5 мА до 3 мА.

### **Некоторые замечания к тексту диссертации**

1. В диссертации требования к пучку нейтронов, генерируемых ускоренным пучком протонов, сформулированы только во введении в виде цели: «требуется пучки тепловых нейтронов с плотностью потока нейтронов  $10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ». Из тезисов, сформулированных в заключении диссертации, не понятно, насколько результаты по оптимизации ускорения и проводки пучков тандем - ускорителя ИЯФ повысили качество (по интенсивности или по энергетическому спектру) нейтронных пучков – конечного продукта исследуемой установки.
2. На стр. 16 текста присутствует фраза: «Теряя часть своей энергии, они ионизируют вещество люминофора, часть ионизационных потерь преобразуется в оптическое излучение». Фраза не корректна ни по форме, ни по содержанию. Во, первых, из этого фрагмента текста следует, что “в оптическое излучение преобразуются ...

потери”. Во - вторых, природа излучения люминофоров не в ионизации атомов материалов, из которых выполнен люминофор, а в их возбуждении. Излучение появляется при переходе атомов из возбуждённого состояние в невозбуждённое.

3. На стр. 76 присутствует фраза «Это позволяет ... измерять ток атомов водорода»

Согласно общепринятому понятию, ток или электроток – это направленное (упорядоченное) движение частиц или квазичастиц - носителей электрического заряда под воздействием электрического поля. Автору следовало бы более корректно изложить цели и результат выполненных измерений, избегая терминологических неточностей.

### **Степень достоверности результатов исследования**

Для достижения поставленных целей соискателю необходимо было решить следующие задачи: изучить установку и особенности её функционирования, понять условия и особенности транспортировки пучков с минимальными потерями на участке инъекции в ускоритель (от источника до входа ускоряющий зазор, далее к обдирочной мишени) и от выхода из ускорителя до нейтронопроизводящей литиевой мишени, что, в свою очередь, диктовало необходимость как поиска и адаптации известных методов и инструментов диагностики, так и разработки и внедрения оригинальных диагностических средств для измерения параметров генерируемых ускорителем пучков и контроля их положения, пространственно – угловых характеристик и фазовых объёмов.

Результаты, представленные в диссертации, наглядны и убедительны. Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью в сравнении с результатами, полученными с использованием независимых методов диагностики. Результаты экспериментальных измерений хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Судя по содержанию работ, опубликованных соискателем в соавторстве с коллегами, решение этих задач в совокупности с решением расчётных задач по ускорению и транспортировке пучка протонов позволило осуществить оптимизацию как режимов ускорения, так и режимов транспортировки пучков ионов на мишень.

## Заключение ускорительной секции Семинара ОИЯИ

1. Содержание диссертации её цели и полученные результаты соответствуют специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника (физико-математические науки).
2. В процессе выполнения диссертационной работы соискателем предложены и разработаны около десятка новых диагностических средств. Большая часть разработанных и внедрённых на ускорителе методов и средств измерения и контроля основных параметров и положения пучка ионов и их фазовых портретов отвечает критериям новизны как по использованию не исследованных ранее эффектов воздействия исследуемых пучков на мишень: по границе области блистерообразования на поверхности металла при имплантации ускоренных протонов, по границе области плавления лития на поверхности мишени, по активации литиевой мишени в реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ , так и по применению известных методов к новым объектам исследования (диагностика эффективности обдирочной газовой мишени по измерению потока атомов водорода, сопутствующего пучку протонов) и по применению известных средств диагностики в новых комбинациях, обеспечивающих дополнительные преимущества по сравнению с традиционными методиками (измерение фазового объёма пучков методом щелей или диафрагм и проволочного сканера, измерение тока пучка ионов аргона, сопутствующего пучку протонов).
3. Представленные в диссертации результаты подтверждают, что цели диссертационной работы соискателя - обеспечение длительной и стабильной генерации тандем – ускорителем с вакуумной изоляцией ИЯФ пучков протонов или дейтронов в широком диапазоне значений энергии (0.6 – 2.2 МэВ) и интенсивности (ток от 0.5 до 3 мА) успешно достигнуты. Пучок протонов, выводимый из ускорителя, имеет параметры (диаметр 9 – 10 мм, расходимость  $\pm 1.5$  мрад, нормализованный эмиттанс 0.2 мм мрад), позволяющие транспортировать его на мишень на расстояние до 10 метров без дополнительных средств фокусировки.
4. Результаты диссертации имеют высокую практическую значимость, так как уже используются в действующих установках (тандем - ускоритель ИЯФ, ускорительный источник нейтронов для центра БНЗТ в г. Сямынь, пр.

Фуцзянь, Китай), а также могут быть применены во вновь разрабатываемых ускорительных установках в Национальном центре онкотерапии в Павии (Италия), в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Блохина в Москве (Россия).

5. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

6. Диссертация Колесникова Ярослава Александровича «Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе - тандеме с вакуумной изоляцией» представляет собой завершённую 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, Колесников Я.А., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Отзыв составил:

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

07.11.2022

Материалы диссертации Колесникова Я.А. «Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе - тандеме с вакуумной изоляцией», 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

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

4.11.2022