

На правах рукописи



Колесников Ярослав Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТРАНСПОРТИРОВКИ И УСКОРЕНИЯ ПУЧКА ИОНОВ
В УСКОРИТЕЛЕ-ТАНДЕМЕ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук
Таскаев Сергей Юрьевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Коваль Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Кулевой Тимур Вячеславович – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», заместитель директора по научной работе по ускорительному направлению

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований»

Защита диссертации состоится «07» декабря 2022 года в «16:30» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «19» октября 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

 Багрянский Петр Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

По данным Всемирной организации здравоохранения распространенность онкологических заболеваний и, как следствие, смертность от них неуклонно растут. Так, в США, Японии и других развитых странах злокачественные опухоли являются непосредственной причиной смерти более чем в 25 % случаев, в то время как 70 лет назад – менее чем в 10 %. Разработка лекарств и методов лечения злокачественных опухолей – важная и до сих пор нерешенная научная задача.

Одной из перспективных методик лечения злокачественных опухолей рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) – избирательное уничтожение клеток опухоли путем накопления в них стабильного изотопа бор-10 и последующего облучения нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция с большим выделением энергии в клетке опухоли, что приводит к ее гибели.

Для терапии глубокоосидающих опухолей требуются пучки эпитепловых нейтронов с плотностью потока $10^9 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Такие пучки нейтронов получают на ядерных реакторах, на которых проведен ряд вполне успешных испытаний методики. Но широкое внедрение БНЗТ в клиническую практику видится только с использованием ускорителей заряженных частиц: их можно размещать в клиниках, они позволяют получать пучки нейтронов лучшего качества.

Задача создать ускорительный источник нейтронов для клинического применения БНЗТ поставлена более 30 лет назад, множество решений предложено, часть из которых так и не реализована из-за сложности, но другая часть близится к успешному завершению. Наиболее продвинутым проектом можно считать проект компании Сумитомо (Япония), оснастившей 30 МэВ 1 МА циклотроном с бериллиевой мишенью клиники БНЗТ в г. Корияма (Япония) и г. Осака (Япония), в которых с 1 июня 2020 года приступили к лечению больных после успешных клинических испытаний. Несколько лучшее качество пучка нейтронов за счет снижения энергии протонов получают в проекте Университета Цукубы (Япония), где используют 8 МэВ 2,8 МА линак с бериллиевой мишенью. Клиника БНЗТ, оснащенная этим источником, находится в г. Токай (Япония); с ноября 2021 года там приступили к проведению предклинических исследований. Практически идеальное качество пучка нейтронов планируют реализовать в трех проектах, в каждом из которых используют литиевую мишень и 2,5 МэВ пучок протонов, но получают пучки протонов на разных ускорителях заряженных частиц. Так, в Национальном онкологическом центре в Токио (Япония) используют 12 МА линак производства AccSys Technology, Inc. (США),

в клинике Университета Хельсинки (Финляндия) – 30 мА ускоритель прямого действия производства Neutron Therapeutics (США), в клинике г. Сямынь (Китай) – 10 мА ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией совместного производства ИЯФ СО РАН и TAE Life Sciences (США).

Степень разработанности темы исследования

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией является электростатическим тандемным ускорителем заряженных частиц оригинальной конструкции, предложенным и разработанным в ИЯФ СО РАН. Ускоритель характеризуется наличием специфических особенностей: высокий темп ускорения и большая сила тока, требующих разработки диагностических средств как для контроля параметров пучка протонов, так и для изучения транспортировки и ускорения ионов.

Цели и задачи

Целью исследования является изучение транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией и обеспечение длительного и стабильного получения пучка ионов в широком диапазоне значений энергии и тока (от 0,6 до 2,3 МэВ, от 0,5 до 10 мА).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать и внедрить диагностические средства для измерения и контроля положения, размера, фазового портрета и тока пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией.
2. Изучить и оптимизировать транспортировку и ускорение пучка ионов.
3. Обеспечить длительное (не менее 1 ч) стабильное получение пучка протонов или дейтронов в широком диапазоне значений энергии и тока для проведения научных исследований.

Научная новизна работы

С применением подвижной охлаждаемой диафрагмы и проволочного сканера измерен фазовой портрет как пучка отрицательных ионов водорода, так и пучка протонов с мощностью пучка до 6 кВт.

Предложены и реализованы методы измерения положения и размера пучка протонов по распространению границы области блистерообразования на поверхности металла при имплантации протонов, по распространению области плавления лития при увеличении мощности пучка протонов, по активации литиевой мишени в реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$.

Определено влияние пространственного заряда на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода от источника до ускорителя и предложен способ компенсации его действия для оптимального ускорения пучка ионов.

Установлено, что пространственный заряд не влияет на транспортировку пучка протонов от ускорителя до литиевой нейтроногенерирующей мишени.

Предложена, разработана и внедрена диагностика эффективности газовой обдирочной мишени по измерению потока нейтралов, сопутствующего пучку протонов.

Измерен ток пучка ионов аргона, сопутствующего протонному пучку.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. При ключевом участии автора разработаны и внедрены диагностические методики, используемые при измерении положения, размера, фазового портрета и тока ионов, подготовлены и проведены экспериментальные исследования по изучению влияния пространственного заряда на транспортировку ионов и по измерению тока пучка ионов аргона, вытекающего из обдирочной мишени. Автором лично освоены и применены для исследований проволочный сканер и измеритель эмиттанса. Автором лично получены и проанализированы экспериментальные результаты при изучении транспортировки и ускорения ионов. При активном участии автора оптимизировано ускорение пучка ионов в ускорителе и обеспечено длительное стабильное получение пучка протонов для проведения научных исследований в области бор-нейтронозахватной терапии, ионной имплантации, радиационного тестирования материалов и измерения сечений ядерных реакций.

Теоретическая и практическая значимость работы

Основная теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что получены новые знания о транспортировке и ускорении ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией, а именно: i) пространственный заряд влияет на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода от источника ионов до ускорителя, и при увеличении тока требуется более сильная фокусировка пучка ионов на вход ускорителя для оптимального ускорения пучка ионов, ii) пространственный заряд не влияет на транспортировку пучка протонов от ускорителя до литиевой мишени, iii) фазовый портрет пучка протонов наиболее чувствителен к фокусировке пучка отрицательных ионов водорода на вход в ускоритель. Разработаны и внедрены новые методы измерения и контроля положения, размера, фазового портрета и тока пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной

изоляция. Применение этих методов позволяет обеспечить длительное стабильное получение пучка протонов для проведения научных исследований.

Полученные знания использованы при изготовлении ускорительного источника нейтронов для центра БНЗТ в г. Сямынь (провинция Фуцзянь, Китай) – первой клиники БНЗТ в Китае и одной из первых шести клиники БНЗТ в мире, и используются при изготовлении источников нейтронов для Национального центра адронной терапии в области онкологии в Павии (Италия) и для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н.Н. Блохина в Москве.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы являются экспериментальные методы исследования, включая численное моделирование и экспериментальное исследование транспортировки и ускорения пучка ионов, и применение метода сравнения для выявления сходств и различий.

Основные положения, выносимые на защиту:

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.

Степень достоверности и апробация диссертации

Достоверность полученных результатов подтверждена длительным стабильным получением пучка протонов или дейтронов в широком диапазоне значений энергии и тока, что позволило изучить динамику радиационного блистеринга поверхности металла при имплантации ионов, провести научные

исследования в области бор-нейтронозахватной терапии, включая лечение домашних животных со спонтанными опухолями, измерить ряд сечений ядерных реакций, изучить радиационную стойкость оптических кабелей и пр.

Основные результаты исследований, лежащие в основе диссертации, в виде 18 докладов представлялись лично автором и обсуждались на 5 международных и 2 российских конференциях: XXV и XXVII Всероссийских конференциях по ускорителям заряженных частиц (Санкт-Петербург, 2016; Алушта, 2021), 9 и 10 Школах молодых исследователей в области бор-нейтронозахватной терапии (Киото, Япония, 2017; Хельсинки, Финляндия, 2019), 6 Международном симпозиуме по отрицательным источникам ионов и пучков (Новосибирск, Россия, 2018), Азиатском форуме ускорителей и детекторов (Новосибирск, Россия, 2021), 19 Международном конгрессе по нейтрон-захватной терапии (Гранада, Испания, 2021).

Большая часть результатов диссертации вошла в научно-квалификационную работу аспиранта, которая успешно защищена в 2022 году.

Исследования поддержаны Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0066, 2014-2016), Российским научным фондом (Соглашения № 16-32-00006, 2014-2018 и № 19-72-30005, 2019-2022), Институтом науки и технологий Окинавы, Япония (Соглашение о сотрудничестве, 2017-2018), компанией TAE Technologies, Inc., США (контракт № 17-132, 2017-2020) и персональным грантом Российского фонда фундаментальных исследований (Договор № 19-32-90118, 2019-2021).

По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 7 в рецензируемых научных журналах из списка ВАК и 8 в трудах конференций. Результаты измерений профиля пучка ионов изложены в научных статьях [3, 6, 7, 10-15], измерений фазового портрета пучка ионов – в научных статьях [1, 3, 6, 9], исследования влияния пространственного заряда на транспортировку пучка ионов – в научных статьях [1, 4, 6, 13], измерения тока ионов аргона – в научных статьях [2, 8], измерения потока атома водорода – в научной статье [5]. Все работы проиндексированы в базе данных Скопус (SCOPUS), все 7 работ в рецензируемых журналах – еще и в базе данных Сеть науки (Web of Science Core Collection).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 149 страниц и включает 84 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 104 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено краткое описание методики борнейтронозахватной терапии, обоснована актуальность проведения исследований, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведено описание методов диагностики пучков заряженных частиц, применимых в стационарных электростатических ускорителях, включая измерение тока, положения, профиля, фазового портрета (таблица 1), проанализирована их применимость для изучения транспортировки и ускорения ионов в ускорителе-тандале с вакуумной изоляцией, уточнены цели и задачи диссертационной работы, обоснован выбор диагностических методик для проведения исследований.

Таблица 1 – Методы диагностики, применимые в стационарных электростатических ускорителях. «0» – диагностика не влияет на пучок, «-» – слабое, пренебрежимое влияние, «+» – возмущает пучок, «1» – разрушает пучок

	Измеряемый параметр				Влияние на пучок			
	Заряд	Положение	Размер / профиль	Поперечный эмиттанс	0	-	+	1
Цилиндр Фарадея	•							•
Ионизационный датчик	•		•			•	•	
Магнитоиндукционный датчик	•				•			
Люминофорный экран		•	•					•
Вторично-эмиссионный сеточный датчик	•	•	•	•		•	•	
Проволочный сканер	•	•	•	•		•		
Лазерный сканер		•	•			•		
Метод щели и решетки	•		•	•				•
Метод перечницы				•				•
Метод нескольких профилей			•	•	•	•		
Метод квадрупольного сканирования				•				•

Во второй главе приведено описание ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и отмечены его особенности. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (далее ускоритель) – это линейный электростатический ускоритель заряженных частиц тандемного типа оригинальной конструкции. В ускорителе не используют ускорительные трубки в отличие от обычных тандемных ускорителей. Вместо них используют вложенные промежуточные электроды (1б), закрепленные на проходном изоляторе (1г), как показано схематически на рисунке 1. Преимуществом такого расположения является удаление керамических частей проходного изолятора достаточно далеко от ионного пучка для увеличения высоковольтной прочности ускоряющих промежутков в надежде на получение большого тока ионного пучка. В главе 2 подчеркнуты решения, позволившие увеличить ток пучка протонов, и указано, что требуемые для БНЗТ параметры пучка протонов, энергия 2,3 МэВ и ток 10 мА, достигнуты, но как предельные, не обеспечивающие долгую стабильную работу. Основные ограничения для длительной стабильной работы определены, предложены способы преодоления ограничений и в изготавливаемых для клиник БНЗТ установках увеличен зазор между промежуточными электродами, добавлено предускорение и источник отрицательных ионов водорода разработки ИЯФ СО РАН заменен на источник ионов компании D-Pace (Канада).

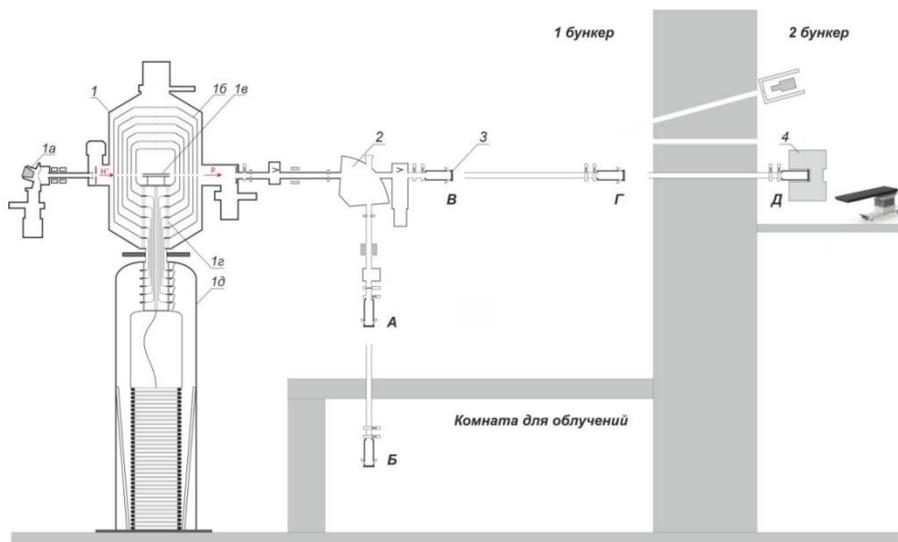


Рисунок 1 – Схема ускорительного источника нейтронов: 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (1а – источник отрицательных ионов водорода, 1б – высоковольтный и промежуточные электроды, 1г – газовая обдирочная мишень, 1д – проходной изолятор, 1д – высоковольтный источник питания), 2 – поворотный магнит, 3 – литиевая нейтроногенирующая мишень, 4 – система формирования пучка нейтронов. А, Б, В, Г, Д – места размещения литиевой мишени

Отмечено, что по мере выполнения основной цели – достижения параметров, удовлетворяющих требованиям БНЗТ, ускоритель стали активно использовать для ряда других приложений, требовавших значений энергии и тока, меньших чем 2,3 МэВ и 10 мА, но стабильных в течение длительного времени, а также получения пучка дейтронов. Такими приложениями стали: *in vitro* и *in vivo* исследования методики БНЗТ с клеточными культурами и лабораторными животными; лечение крупных домашних животных со спонтанными опухолями; изучение радиационного блистеринга поверхности металлов при имплантации протонов; измерение сечения ряда ядерных реакций; изучение глубинного распределения элементного состава тонких пленок методом энергетического анализа обратно рассеянных протонов; *in situ* измерение пространственного распределения толщины литиевого слоя мишени; радиационное тестирование материалов Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР и Большого адронного коллайдера ЦЕРН. Все эти приложения ускорителя и освоенные режимы его работы стали в значительной степени результатом проведенного исследования, представленного в диссертационной работе.

В главе 2 отмечены особенности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, включая то, что i) ускоритель является новым типом ускорителя заряженных частиц, ii) ускоритель обеспечивает быстрый темп ускорения ионов – до 25 кВ/см, из-за чего входная электростатическая линза ускорителя сильная, iii) обдирку отрицательных ионов водорода в протоны производят в газовой обдирочной мишени, для чего подают достаточно большой поток аргона, iv) ускоритель ограничен имеющимся радиационно-защищенным помещением, v) ускоритель изначально предложен для решения проблемы бор-нейтронозахватной терапии и проектировался на вполне определенные параметры: 10 мА и 2,3 МэВ, но по мере разработки его стали применять для других приложений, требующих других значений тока, энергии, и типа ионов: не только протонов, но и дейтронов, vi) ускоритель является самодельным оборудованием, состав и комплектация которого модернизируются по мере возможности и по мере получения научных знаний в результате проведения научных исследований.

Третья глава посвящена исследованию и оптимизации инъекции пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель.

Для выяснения того, действует ли пространственный заряд на транспортировку отрицательных ионов, изучена зависимость размера и тока пучка ионов, инжектируемого в ускоритель, от давления остаточного газа, изменяемого установленным натекателем. Схема тракта транспортировки пучка ионов представлена на рисунке 2. Отрицательные ионы водорода с энергией до 23 кэВ генерирует поверхностно-плазменный источник 1. Выходящий из источника пучок поворачивается в магнитном поле источника на угол 15° , проходит через отверстие конусной диафрагмы 2,

фокусируется магнитной линзой 5 и через отверстие охлаждаемой диафрагмы 8 инжектируется в ускоритель. Откачка газа осуществляется двумя турбомолекулярными насосами 4 и 13 со скоростью откачки по водороду 2400 л/с. Давление остаточного газа измеряется вакуумной лампой Pfeiffer vasiuum d-35614 (3). Измерение тока и профиля пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемого в ускоритель, проводят проволочным сканером OWS-30 (D-Pace, Канада) (7), размещенным перед охлаждаемой диафрагмой 8. На рисунке 3 приведена зависимость тока и площади сечения пучка отрицательных ионов водорода от давления остаточного газа, регулируемого натекателем.

Видно, что с ухудшением вакуумных условий уменьшается не только ток ионов, что связано с их обдиркой на остаточном газе, но и размер пучка, что объясняется ослаблением действия пространственного заряда из-за наличия неполной компенсации заряда ионов. Следовательно, при обычных условиях (2,5 мПа), когда вакуумные условия специально не ухудшаются, пространственный заряд действует, заметно увеличивая площадь сечения пучка. Заметим, что эксперимент проведен без напуска аргона в газовую обдирочную мишень ускорителя. Однако напуск обдирочного газа не приводит к кардинальному ухудшению вакуумных условий в тракте транспортировки пучка отрицательных ионов и действие пространственного заряда сохраняется.

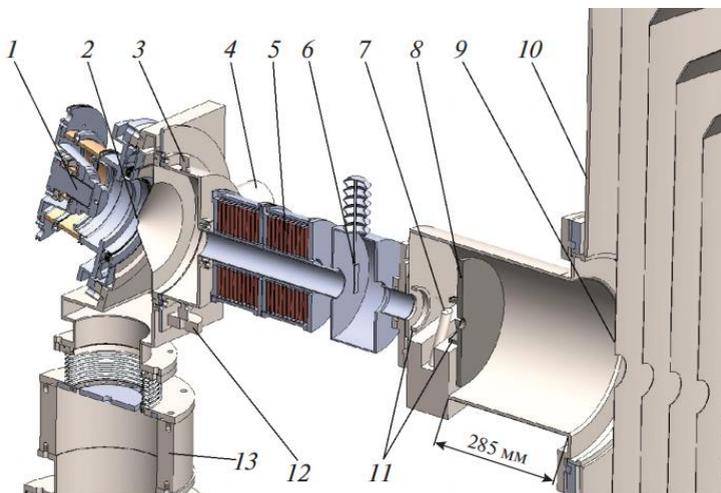


Рисунок 2 – Схема тракта транспортировки пучка отрицательных ионов водорода: 1 – источник отрицательных ионов водорода, 2 – конусная диафрагма, 3 – вакуумная лампа, 4 и 13 – турбомолекулярные насосы, 5 – магнитная линза, 6 – подвижная диафрагма, 7 – проволочный сканер OWS-30, 8 – охлаждаемая диафрагма, 9 – первый электрод ускорителя, 10 – вакуумный бак ускорителя, 11 – металлические кольца, 12 – натекатель

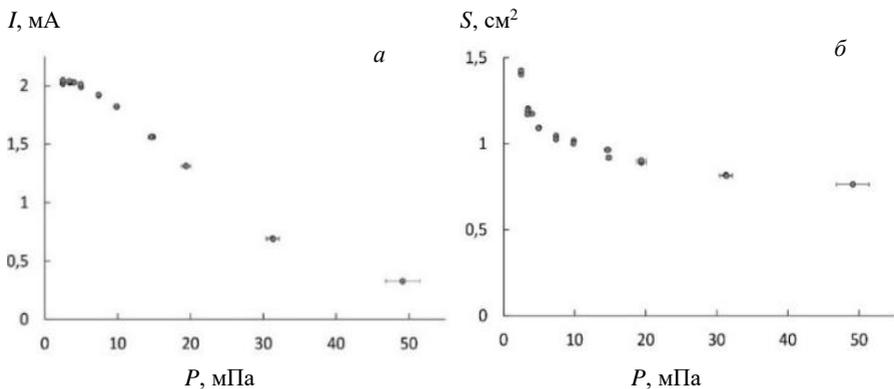


Рисунок 3 – Зависимость тока I (а) и площади сечения S (б) пучка отрицательных ионов водорода от давления остаточного газа P

На рисунке 4 представлены фазовые портреты инжектируемого пучка ионов, измеренные измерителем эмиттанса ES-4 (D-Pace, Канада), установленным вместо проволочного сканера OWS-30. Видно, что с увеличением тока с 0,44 мА до 3 мА увеличивается эмиттанс пучка ионов (с 0,13 мм мрад до 0,2 мм мрад) и его размер (с 3,92 мм до 4,59 мм). Первое обусловлено изменением разряда в источнике ионов, второе — действием пространственного заряда при транспортировке ионов от источника ионов до ускорителя.

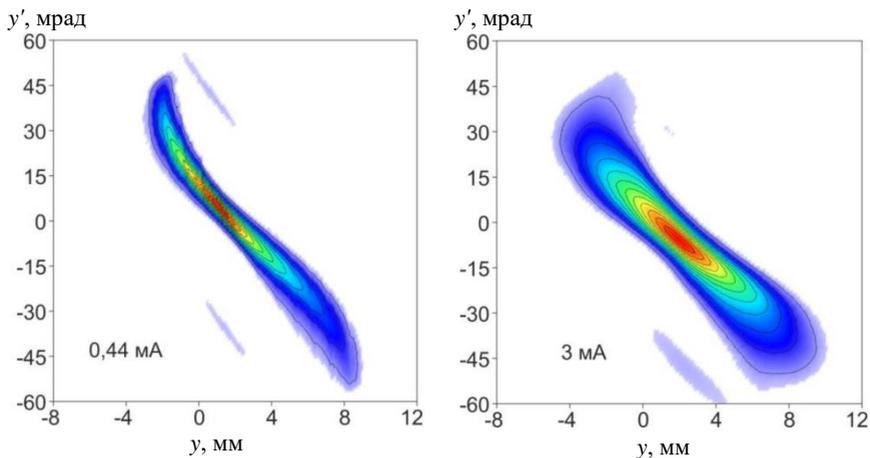


Рисунок 4 – Фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемых в ускоритель, при разных значениях тока (значения тока приведены в левом нижнем углу на фазовом портрете пучка)

Поскольку входная электростатическая линза ускорителя сильная и на транспортировку пучка отрицательных ионов оказывает влияние пространственный заряд, то для оптимального ускорения ионов требуется обеспечить контроль положения и размера пучка ионов на входе в ускоритель. Для решения этой задачи разработаны и внедрены две диагностические методики. Первая методика заключается в использовании проволочного сканера OWS-30. Измеренные сканером в двух направлениях профили пучка ионов позволяют восстановить координаты центра пучка ионов и его размер. Второй применяемой методикой контроля положения пучка является оптическая – входной узел ускорителя модифицирован таким образом, что видеокамера видит входную охлаждаемую диафрагму ускорителя, излучение в оптическом диапазоне, обусловленное ионизацией остаточного газа ионами, и проволочки сканера, когда они пересекают пучок при измерении.

Также в главе 3 представлены результаты исследования, когда подвижной охлаждаемой диафрагмой и проволочным сканером измерен фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода, форма которого указывала на заметное влияние сферической аберрации магнитных линз на фокусировку ионов. Для улучшения качества инжектируемого в ускоритель пучка ионов магнитная линза модернизирована: катушка, ближняя к источнику ионов, усилена и приближена к источнику, вторая катушка размещена вплотную к первой. Проведенная модернизация магнитной линзы привела к уменьшению сферических аберраций и сделала фазовый портрет пучка больше похожим на эллипс, как видно на рисунке 4.

Таким образом, с применением разработанных диагностических средств установлено, что транспортировка и инжекция пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель сопровождаются действием пространственного заряда, и для оптимального ускорения ионов при изменении тока требуется корректировка силы фокусирующей линзы. Применение проволочного сканера и видеокамер обеспечивает измерение и контроль положения и размера пучка отрицательных ионов водорода на входе в ускоритель.

Четвертая глава посвящена диагностике пучка ионов и сопутствующих потоков частиц в ускорителе.

Как отмечено ранее, ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, в отличие от традиционных тандемных ускорителей, не содержит ускорительных трубок как таковых. Ускорительный канал формируется в пространстве вложенных друг в друга электродов цилиндрической формы, в которых соосно сделаны отверстия диаметром 20 мм в тракте ускорения отрицательных ионов и 30 мм в тракте ускорения протонов. Внутри высоковольтного электрода диаметром 60 см установлена газовая обдирочная мишень, в которой отрицательные ионы превращаются в положительные. Мишень выполнена в виде охлаждаемой цилиндрической трубки длиной 400 мм с диаметром отверстия 16 мм с напуском газа посередине. Если газовая обдирочная мишень охлаждается

трансформаторным маслом, то диафрагмы ускоряющих электродов ничем принудительно не охлаждаются, и потому часто подвергались повреждению при смещении пучка ионов от оси. Чтобы исключить повреждение газовой обдирочной мишени и диафрагм электродов при нагреве пучком ионов, необходимо было разработать и внедрить диагностические средства, обеспечивающие контролируемое ускорение ионов.

Для измерения мощности, снимаемой с газовой обдирочной мишени, разработана и внедрена калориметрическая диагностика, которую постоянно используют, добиваясь минимального нагрева газовой обдирочной мишени для оптимального ускорения ионов.

Второй диагностикой стала оптическая – входной и выходной узлы ускорителя модернизированы таким образом, что стало возможно разместить по паре видеокамер, направленных на входную и выходную диафрагму внешнего ускоряющего электрода. Видеокамеры настроены таким образом, что позволяют одновременно видеть и пучок ионов из-за ионизации ионами остаточного и обдирочного газа, и нагрев диафрагм. Примеры изображений приведены на рисунке 5. Оптическая диагностика стала рутинным инструментом, обеспечивающим визуальный контроль за нагревом диафрагм и инструментальный контроль за положением и размером пучка ионов – написанное Т.А. Быковым программное обеспечение в режиме реального времени обрабатывает поток изображений с пары видеокамер и выводит на монитор оператора текущее положение и размер пучка ионов в области диафрагмы первого ускоряющего электрода.



Рисунок 5 – Прохождение пучка отрицательных ионов водорода без нагрева входной диафрагмы (слева) и нагрев входной диафрагмы при повышении тока пучка (справа). Пучок ионов виден синим, нагрев диафрагмы – красным

Пучок протонов в ускорителе обычно получают в режиме, когда газовая обдирочная мишень обеспечивает 95%-ную обдирку отрицательных ионов водорода, т.е. 95 % отрицательных ионов водорода теряют в мишени оба электрона и превращаются в протоны, а оставшиеся 5 % теряют только один электрон и вылетают из обдирочной мишени в виде атомов водорода.

Оптические свойства ускорителя таковы, что инжектируемый пучок отрицательных ионов водорода перефокусируют на вход в ускоритель с тем, чтобы с помощью входной электростатической линзы обеспечить его параллельность в обдирочной мишени. Далее, на выходе, протонный пучок слегка дефокусируется выходной электростатической линзой. Поток атомов водорода формируется в газовой обдирочной мишени в виде направленного примерно параллельного пучка, на который не действует выходная электростатическая линза, следовательно, его поперечный размер сохраняется малым на большом расстоянии. Для диагностики эффективности обдирки газовой обдирочной мишени изготовлен новый поворотный магнит, оснащенный сквозным горизонтальным патрубком. В этом случае атомы водорода, которые не отклоняются магнитным полем, пролетают сквозь поворотный магнит и регистрируются цилиндром Фарадея, установленным за ним.

Из измеренной вольтамперной характеристики цилиндра Фарадея определено, что для 1 МэВ протонов коэффициент ионно-электронной эмиссии равен $k = 0,29 \pm 0,02$. Поскольку при таких энергиях бомбардирующих частиц определяющим в испускании электронов становится механизм кинетического выбивания, то коэффициент эмиссии не будет отличаться от того, бомбардируется ли поверхность металла протонами или атомами водорода. Следовательно, коэффициент вырывания электронов под действием атомов водорода с энергией 1 МэВ считаем равным коэффициенту ионно-электронной эмиссии при бомбардировке протонами с энергией 1 МэВ. В режиме с включенным поворотным магнитом, когда пучок протонов направляют вниз, одновременное измерение тока пучка протонов I_p бесконтактным датчиком тока и тока в цепи цилиндра Фарадея I_{fc} позволяет программным образом вычислять эффективность обдирки газовой обдирочной мишени как $\varepsilon = I_p / (I_p + I_{fc}/k)$ и с частотой дискретизации 1 Гц выводить на монитор пультовой установки в виде столбца с информацией о текущем значении ε и в виде графика предыдущих значений с настраиваемыми по длительности осью абсцисс и по величине осью ординат.

С применением подвижной охлаждаемой диафрагмы и проволочного сканера измерен фазовый портрет потока атомов водорода на расстоянии 1,86 м от центра ускорителя (рисунок 6). Определено, что размер потока атомов водорода составляет 6-6,5 мм, его расходимость 1,9-2,4 мрад. Поскольку атомы водорода распространяются прямолинейно, зная характеристики потока атомов водорода на расстоянии 1,86 м от центра ускорителя, оценим размер потока атомов водорода внутри газовой обдирочной мишени, размещаемой в центре ускорителя. Получим, что размер потока атомов водорода в обдирочной мишени составляет 2-2,5 мм. Таким же должен быть размер пучка ионов в обдирочной мишени. Полученное значение хорошо согласуется с размером свечения радиусом 2 мм, регистрируемого телескопом Celestron Ultima 80-45, направленным внутрь газовой обдирочной

мишени вдоль горизонтальной оси ускорителя через медное охлаждаемое зеркало, установленное за поворотным магнитом (рисунок 7).

Газовая обдирочная мишень обеспечивает эффективную обдирку пучка отрицательных ионов, но формирует нежелательный поток ионов аргона. Взаимодействие пучка ионов водорода с газовой мишенью приводит к частичной ионизации аргона, и внутри обдирочной трубки образуется слабоионизованная плазма. Поскольку электроны более подвижны, чем ионы аргона, для сохранения квазинейтральности плазма принимает положительный потенциал. Под действием положительного потенциала часть ионов аргона выходит из обдирочной трубки, попадает в ускорительный канал и формирует пучок ионов аргона. Простые оценки тока ионов аргона дают значения величин от соизмеримых до пренебрежимо малых по сравнению с током протонов. Достоверно оценить величину тока ионов аргона сложно из-за неоднородности конвертируемого пучка и вторичной плазмы вдоль мишени, возможности развития пучково-плазменной неустойчивости, проникновения электрического поля ускоряющих зазоров внутрь высоковольтного терминала и множества других параметров, которые достоверно не известны. Для подавления проникновения ионов аргона в ускорительные зазоры предложено размещать перед обдирочной мишенью и после нее металлические кольца под отрицательным или положительным потенциалом либо отклонять пучок ионов магнитным полем внутри высоковольтного терминала.

y' , мрад

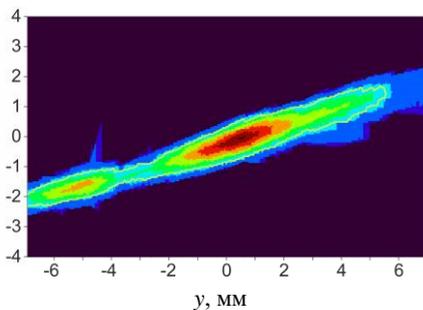


Рисунок 6 – Фазовый портрет потока атомов водорода при 2 мА 2 МэВ пучке протонов

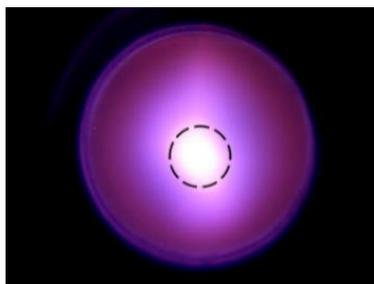


Рисунок 7 – Изображение с видеокamеры телескопа. Пунктирный круг обозначает диаметр 5 мм, диаметр трубки обдирочной мишени 16 мм

Для измерения тока ионов аргона применен метод масс-спектропии. Внутрь поворотного магнита вставлена охлаждаемая диафрагма с щелью 5×20 мм. Измерения проведены при токе пучка протонов 760 ± 10 мкА, энергии $1,850 \pm 0,002$ МэВ, поперечном размере пучка порядка 1 см.

Поскольку масса иона аргона в 40 раз больше массы протона, а кинетическая энергия в два раза меньше, то ларморовский радиус иона в магнитном поле в $\sqrt{20}$ раз меньше ларморовского радиуса протона, и поворотный магнит будет отклонять ионы аргона на угол, в $\sqrt{20}$ раз меньший, чем угол отклонения протонов. При подаче тока в катушки поворотного магнита все компоненты пучка разделяются на поверхности литиевой мишени (рисунок 8а), что видно по люминесценции под действием частиц. При увеличении тока в катушках магнита протонный пучок полностью попадает на охлаждаемый коллиматор, в то время как пучки атомов водорода и ионов аргона проходят через щель коллиматора и попадают на литиевую мишень (рисунок 8б).

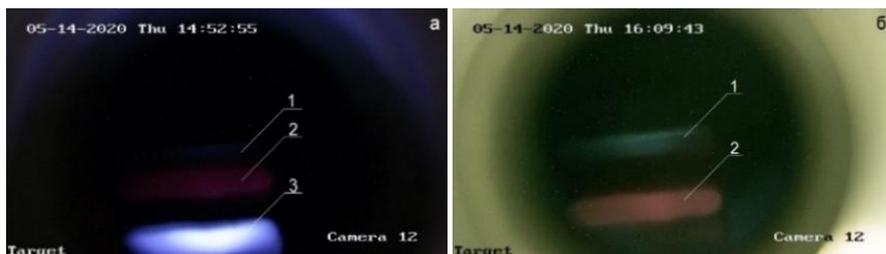


Рисунок 8 – Изображение с видеокамеры, направленной на поверхность литиевой мишени. Слева – при токе в катушке поворотного магнита 14 А, справа – 68,5 А. 1 – пучок атомов водорода, 2 – пучок ионов аргона, 3 – пучок протонов

В этом режиме измерен ток заряженных частиц, проходящих через отверстие в диафрагме и попадающих на поверхность литиевой мишени; он составил 150 ± 70 нА. Так как максимальный ток протонов, проходящий через щелевое отверстие диафрагмы, равен 286 ± 3 мкА, полагая размеры пучков ионов аргона и протонов равными, получим, что ток ионов аргона в 2000 раз меньше тока протонов. При такой величине ток пучка ионов аргона не представляет опасности ни в качестве источника дополнительного нагрева литиевой мишени, ни как дополнительная нагрузка высоковольтного источника питания и потому не требует применения средств для его подавления.

Пятая глава посвящена исследованию и оптимизации транспортировки пучка протонов от ускорителя до литиевой мишени.

В параграфе 5.1 приведено описание реализованных решений, позволивших транспортировать пучок ионов без повреждения элементов вакуумной камеры. Вместо двух пар квадрупольных линз на установке по всему высокоэнергетическому тракту были установлены медные охлаждаемые диафрагмы (до пяти в зависимости от размещения мишени) для предохранения элементов установки от нагрева и последующего прожигания протонным пучком. Основным предназначением охлаждаемых

диафрагм является поглощение гало пучка и, в случае необходимости, кратковременное поглощение пучка при резком изменении параметров разряда в источнике отрицательных ионов водорода или пульсациях в напряжении, приходящих с подстанции, на источник высоковольтного питания. Дополнительным предназначением диафрагм стало их использование в качестве термического аналога пикап-электрода. Внутри каждой из диафрагм аксиально симметрично вставлены по 4 термодары, с помощью которых определяют смещение протонного пучка относительно оси его транспортировки за счет разницы температур, а средняя температура термосопротивлений характеризует угловую расходимость протонного пучка. Данная диагностика смещения пучка в совокупности с визуальным наблюдением пучка видеокамерами и диагностикой мощности, снимаемой с газовой обдирочной мишени, рутинно используется оператором для проведения пучка ионов через всю установку.

Положение пучка протонов на поверхности литиевой мишени контролируют, регистрируя видеокамерой люминесценцию поверхности литиевой мишени или оставляемый пучком отпечаток.

Литиевая мишень представляет собой медную подложку, выполненную в виде диска, на одну из сторон которого напыляют литий, а другую сторону охлаждают турбулентным потоком воды. Оказалось удобным измерять положение и размер пучка протонов на поверхности литиевой мишени с помощью термосопротивлений, вставленных в отверстия, просверленные в медном диске с торца.

В параграфе 5.2 представлены разработанные методы диагностики положения, размера, профиля и фазового портрета протонного пучка и результаты измерений, проведенных ими.

Так, при проведении ряда научных исследований профиль пучка протонов измерен по распространению границы области образования блистеров с увеличением флюенса протонов, по распространению границы плавления лития с увеличением мощности пучка протонов, по активации литиевой мишени радиоактивным изотопом бериллий-7, образующимся в реакции генерации нейтронов ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, и сканированием щелью или отверстием.

В параграфе 5.3 описан реализованный способ измерения фазового портрета пучка протонов и результаты проведенных исследований.

Для измерения фазового портрета пучка протонов использован предложенный нами методический прием с подвижной диафрагмой и проволочным сканером: часть пучка ионов вырезают диафрагмой и измеряют его профиль проволочным сканером на некотором расстоянии. Набор данных, полученных при сканировании пучка ионов диафрагмой, позволяет восстановить фазовый портрет пучка ионов и определить его эмиттанс. На рисунке 9 представлены результаты измерения фазового портрета пучка протонов при изменении тока.

Видно, как с увеличением тока изменяется портрет. Если при токе 0,5 мА пучок практически параллельный и имеет поперечный размер $y = 4,2$ мм, то с увеличением тока увеличивается его размер и он становится расходящимся. При токе 3 мА пучок характеризуется расходимостью $y' = 1,6$ мрад и имеет поперечный размер $y = 5,2$ мм. Такое поведение объясняется действием пространственного заряда в тракте транспортировки пучка отрицательных ионов водорода: при увеличении тока увеличивается действие пространственного заряда, ионы приобретают дополнительный поперечный импульс, и пучок становится шире.

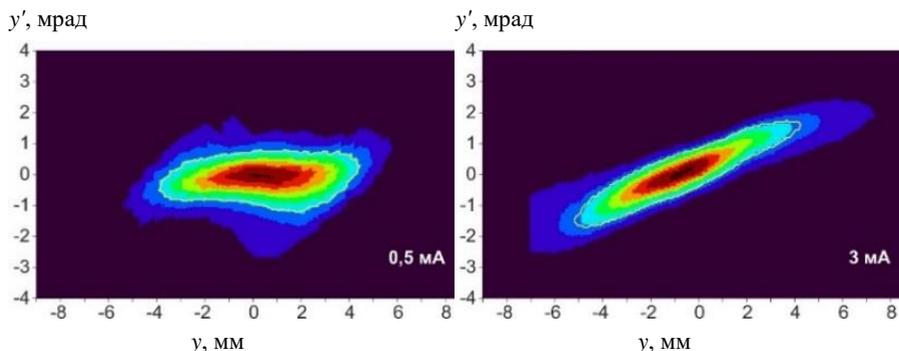


Рисунок 9 – Фазовый портрет пучка протонов (y, y') при токе 0,5 и 3 мА

Изучим влияние силы магнитной линзы на пучок протонов. Измерим фазовый портрет пучка протонов при стандартно используемой силе магнитной линзы (назовем этот режим оптимальным), а также при уменьшении или увеличении тока в катушках линзы на 1,6 % (назовем эти режимы слабым и сильным). На рисунке 10 представлены результаты измерения фазового портрета 2 мА пучка протонов.

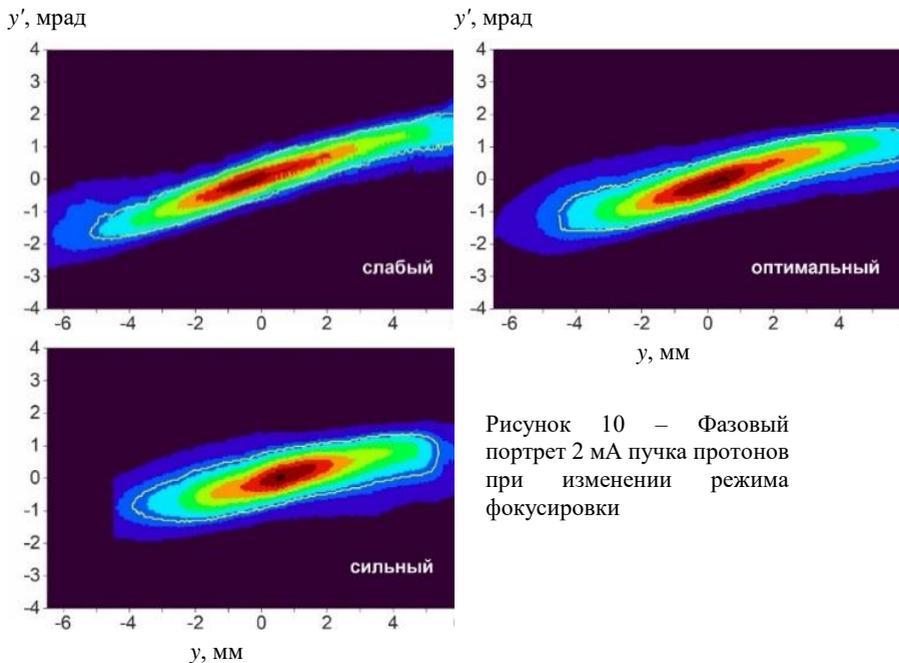


Рисунок 10 – Фазовый портрет 2 мА пучка протонов при изменении режима фокусировки

Видно, при переходе от слабого режима фокусировки к сильному уменьшается и размер пучка, и его угловое расхождение. Кажется, что сильный режим фокусировки лучше, чем оптимальный. Однако при сильном режиме фокусировки входная диафрагма внешнего ускоряющего электрода нагревается до уровня, не пригодного для постоянной работы.

Поэтому визуальный контроль за нагревом входной диафрагмы ускорителя в комбинации с использованием охлаждаемых диафрагм с термосопротивлениями в высокоэнергетическом тракте является наиболее адекватным нами реализованным методом для стабильного и долговременного получения пучка протонов в широком диапазоне параметров.

В результате проведенного исследования установлено, что на выходе из ускорителя пучок протонов при оптимальной фокусировке имеет диаметр 10 ± 1 мм, расходимость $\pm 1,5$ мрад, эмиттанс $\epsilon_{\text{норм}} = 0,2$ мм·мрад.

Такой пучок может быть доставлен на расстояние 10 м до литиевой мишени диаметром 100 мм без применения фокусирующих элементов.

В параграфе 5.4 представлены результаты измерения зависимости размера пучка протонов на поверхности литиевой мишени от тока пучка протонов с применением термосопротивлений, вставленных внутрь медной подложки литиевой мишени, и инфракрасной камеры. Установлено, что размер пучка

протонов на мишени не зависит от тока пучка в диапазоне от 0,48 до 3,2 мА; диаметр пучка протонов равен 33 ± 5 мм. Отсутствие зависимости размера пучка на мишени от его тока указывает на отсутствие заметного влияния пространственного заряда на транспортировку пучка протонов от ускорителя до мишени. Данное обстоятельство упрощает комплектацию тракта транспортировки пучка, поскольку не требует установки квадрупольных линз, и существенно упрощает получение пучка протонов в широком диапазоне изменения тока, что важно при проведении исследований на установке.

В параграфе 5.5 в единую таблицу сведены реализованные методы диагностики ионного пучка, подчеркнуты результаты, полученные с их применением, и указаны границы применимости диагностик. Кратко сформулированы основные результаты проведенного исследования.

В заключении представлены основные результаты работы и даны рекомендации дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Предложен, разработан и использован комплекс диагностических средств и методов (оптические, тепловые, токовые и активационные) для измерения и контроля параметров (размера и фазового портрета) и положения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией.

2. С применением охлаждаемых диафрагм, видеокамер, проволочного сканера, измерителя эмиттанса и контролируемого напуска воздуха исследована и оптимизирована инжекция пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией.

3. С применением подвижного охлаждаемого коллиматора и проволочного сканера измерен фазовый портрет пучка протонов и изучена его зависимость от тока инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода и от фокусирующей силы магнитной линзы.

4. С применением термосопротивлений, размещенных внутри литевой нейтроногенерирующей мишени, и инфракрасной видеокамеры изучена зависимость поперечного размера пучка протонов от тока пучка и определено влияние пространственного заряда на его транспортировку.

5. Предложен и реализован способ измерения потока сопутствующих протонам атомов водорода, обеспечивающий оперативный контроль эффективности газовой обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

6. Методом масс-спектрометрии с регистрацией люминесценции поверхности литевой мишени измерена величина тока сопутствующих

протонам ионов аргона, исходящих из газовой обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

7. В результате использования разработанных диагностических средств предложен и реализован сценарий, обеспечивающий длительное стабильное получение в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией пучков протонов или дейтронов в широком диапазоне энергий и интенсивности как для развития методики БНЗТ, так и для изучения радиационного блистеринга металлов при имплантации ионов, для измерения сечений ядерных реакций, для радиационного тестирования перспективных материалов и для целого ряда других приложений.

Рекомендуется продолжить дальнейшую разработку диагностических средств оперативного контроля положения и размера пучка ионов и их внедрение в систему управления установкой и сбора данных. Также рекомендуется изучить транспортировку и ускорение ионов для модернизации ускорителя с целью повышения его надежности, требуемой при проведении терапии и научных исследований.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Measuring the Phase Portrait of an Ion Beam in a Tandem Accelerator with Vacuum Insulation / M. I. Bikchurina, T. A. Bykov, Ya. A. Kolesnikov [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2022. – Vol. 65, nr 4. – P. 551–561. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0020441222040169>. – Дата публикации: 12.09.2022.
2. Measuring the Current of a Beam of Argon Ions Accompanying a Beam of Protons in a Tandem Accelerator with Vacuum Insulation / Ya. A. Kolesnikov, G. M. Ostreynov, P. D. Ponomarev [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2021. – Vol. 64, nr 4. – P. 503–507. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441221040199>. – Дата публикации: 27.07.2021.
3. Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target / S. Taskaev, E. Berendeev, M. Bikchurina [et. al.]. – Текст : электронный // Biology. – 2021. – Vol. 10, nr 5. – P. 350. – URL: <https://doi.org/10.3390/biology10050350>. – Дата публикации: 21.04.2021.
4. A Study of the Spatial Charge Effect on 2-MeV Proton Beam Transport in an Accelerator-Based Epithelial Neutron Source / T. A. Bykov, D. A. Kasatov, Ia. A. Kolesnikov [et al.]. – Текст : электронный // Technical Physics. – 2021. – Vol. 66, nr 1. – P. 98–102. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063784221010047>. – Дата публикации: 28.02.2021.
5. Diagnostics of the Efficiency of a Gas Stripping Target of a Tandem Accelerator with Vacuum Insulation / Ya. A. Kolesnikov, A. M. Koshkarev, S. Yu. Taskaev, I. M. Shchudlo. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Vol. 63, nr 3. – P. 310–314. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441220040065>. – Дата публикации: 15.06.2020.
6. Use of a Wire Scanner for Measuring a Negative Hydrogen Ion Beam Injected in a Tandem Accelerator with Vacuum Insulation / T. A. Bykov, D. A. Kasatov, Ia. A. Kolesnikov [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2018. –

- Vol. 61, nr 5. – P. 713–718. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441218050159>. – Дата публикации: 27.09.2018.
7. In Situ Observations of Blistering of a Metal Irradiated with 2-MeV Protons / A. Badrutdinov, T. Bykov, S. Gromilov [et al.]. – Текст : электронный // Metals. – 2017. – Vol. 7, nr 12. – P. 558. – URL: <https://doi.org/10.3390/met7120558>. – Дата публикации: 12.12.2017.
 8. Measurement of the Argon Ions Current Accompanying at the Accelerating Source of Epithermal Neutrons / I. A. Kolesnikov, Yu. M. Ostreinov, P. D. Ponomarev [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXVII Russian Particle Accelerator Conference (Alushta, 26 September – 2 October 2021). – Geneva, Switzerland, 2021. – P. 334–336. – URL: <https://epaper.kek.jp/rupac2021/papers/tupsb52.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).
 9. Measurement of the Phase Portrait of a 2 MeV Proton Beam Along Beam Transfer Line / T. Bykov, Ia. Kolesnikov, S. Savinov [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXVII Russian Particle Accelerator Conference (Alushta, 26 September – 2 October 2021). – Geneva, Switzerland, 2021. – P. 399–401. – URL: <https://epaper.kek.jp/rupac2021/papers/wepsc30.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).
 10. 2D-Tomography of the Proton Beam in the Vacuum Insulated Tandem Accelerator / M. I. Bikchurina, I. A. Kolesnikov, S. S. Savinov [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXVII Russian Particle Accelerator Conference (Alushta, 26 September – 2 October 2021). – Geneva, Switzerland, 2021. – P. 402–403. – URL: <https://epaper.kek.jp/rupac2021/papers/wepsc31.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).
 11. Proton Beam Size Diagnostics Used in the Vacuum Insulated Tandem Accelerator / M. I. Bikchurina, T. A. Bykov, D. A. Kasatov [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXVII Russian Particle Accelerator Conference (Alushta, 26 September – 2 October 2021). – Geneva, Switzerland, 2021. – P. 404–406. – URL: <https://epaper.kek.jp/rupac2021/papers/wepsc32.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).
 12. Measurement of a H⁻ Ion Beam with D-Pace's OWS-30 Wire Scanner / T. Bykov, Ia. Kolesnikov, A. Makarov [et al.]. – Текст : электронный // AIP Conference Proceedings : Proceedings of the 6th International symposium on Negative Ions, Beams and Sources (Novosibirsk, 3–7 September 2018). – Melville, NY, USA, 2018. – P. 050013. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5083767>. – Дата публикации: 28.12.2018.
 13. Measurement of the Space Charge Effect of a Negative Hydrogen Ion Beam / T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov [et al.]. – Текст : электронный // AIP Conference Proceedings : Proceedings of the 6th International symposium on Negative Ions, Beams and Sources (Novosibirsk, 3–7 September 2018). – Melville, NY, USA, 2018. – P. 070004. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5083784>. – Дата публикации: 28.12.2018.
 14. Measurement of the ion beam profile with the D-PACE wire scanner / E. O. Sokolova, D. A. Kasatov, A. M. Koshkarev [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXV Russian Particle Accelerator Conference (Saint Petersburg, 21–25 November 2016). – Geneva, Switzerland, 2017. – P. 695–697. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/papers/thpsc069.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).
 15. Measurement of the proton beam profile via an activation method of diagnostics / E. O. Sokolova, D. A. Kasatov, A. N. Makarov [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXV Russian Particle Accelerator Conference (Saint Petersburg, 21–25 November 2016). – Geneva, Switzerland, 2017. – P. 698–699. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/papers/thpsc070.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).

Колесников Ярослав Александрович

Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 30.09.2022.

Подписано в печать 03.10.2022.

Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 7

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11