

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
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 исследования**

Для ряда разновидностей онкологических заболеваний бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) является практически единственным методом лечения. Для реализации БНЗТ во всем мире активно ведется разработка и создание установок на базе линейных ускорителей протонов и литиевой или бериллиевой мишеней. Создание такой установки в Российской Федерации и вывод ее на параметры, приемлемые для лечения онкологических пациентов безусловно актуально и является большим достижением.

#### **Структура и содержание работы**

Работа является законченным научным трудом и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 149 страниц.

Во **введении** обоснованы актуальность и цель диссертации. Сформулированы цель и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, указан личный вклад автора в выполненные работы.

**Первая глава** посвящена обзору методов диагностики параметров непрерывных пучков заряженных частиц, а именно: профиля пучка, тока пучка и, особенно, подробно рассмотрены методы измерения эмиттанса пучка.

**Во второй главе** дано описание ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, разработанного и успешно работающего в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера. Показано, что на установке в предельных режимах достигнуты параметры пучка,

требуемые для реализации БНЗТ, и намечены пути обеспечения устойчивой работы установки при данных параметрах.

**В третьей главе** приводятся результаты исследования и оптимизации инжекции пучка отрицательных ионов в ускоритель тандем. Для этого были разработаны диагностические средства измерения и контроля положения и профиля пучка, а также тока пучка. Проведено исследование влияния собственного заряда пучка отрицательных ионов на эмиттанс пучка и его поперечные размеры. Показано, что при рабочих значениях давления пучок отрицательных ионов имеет частичную компенсацию, что необходимо учитывать при согласовании пучка с ускоряющим каналом. Для обеспечения согласования пучка на входе в ускоряющий канал разработаны и внедрены две диагностические методики. Первая базируется на проволочном сканере и позволяет определить положение центра масс пучка, а также размер пучка. Вторая методика опирается на методе визуализации излучения в оптическом диапазоне, обусловленного ионизацией остаточного газа проходящим пучком.

**Четвертая глава** описывает систему диагностики пучка ионов и сопутствующих потоков частиц в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Разработана и создана калориметрическая диагностическая система для измерения мощности, снимаемой с газовой обдирочной мишени. Для контроля положения пучка в ускорителе разработана система визуального контроля на основе видеокамер. Данная система позволяет обеспечить не только контроль над осью и размером пучка, но также обеспечивает контроль за нежелательным нагревом входной и выходной диафрагм ускорителя-тандема. Для контроля за нейтральными атомами водорода, полученными при неполной обдирке первичного пучка отрицательных ионов в канал вывода пучка внедрен поворотный магнит с прямым каналом и цилиндр Фарадея, работающий на вторичных электронах, выбиваемых атомами водорода с энергией 1 МэВ. Приведены результаты измерения пучка аргона, генерируемого за счет ионизации рабочего газа перезарядной мишени.

**В пятой главе** представлены результаты диагностики пучка протонного пучка на выходе ускорителя-тандема. Представлены методы диагностики положения, размера, профиля и фазового портрета пучка. Система диагностики обеспечивает настройку и оптимизацию проводки пучка от выхода ускорительного

канала до мишени. Установленные диафрагмы позволили убрать гало пучка. Установка термодпар в диафрагмы позволило использовать их для определения положения центра тяжести пучка в месте установки диафрагм. Термодпары использовались и для контроля положения пучка на литиевой мишени. При этом термодпары были установлены в медный опорный диск мишенной сборки. Приведены результаты измерения эмиттанса пучка при различных значениях ускоренного тока. Измерение размера пучка при различных значениях ускоренного тока протонов позволило сделать вывод, что на данном участке влияние собственного пространственного заряда при достигнутых интенсивностях пучка несущественно.

**В заключении** представлены основные результаты работы и даны рекомендации по дальнейшему развитию работ.

### **Научная новизна диссертационной работы**

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 атомов водорода, сопутствующего пучку протонов.

### **Научная и практическая значимость полученных результатов**

В результате выполненных работ показано, что 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. В то же

время, пространственный заряд ускоренного пучка протонов не влияет на его транспортировку от выхода ускорителя до литиевой мишени Разработаны и внедрены новые методы измерения и контроля положения, размера, фазового портрета и тока пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Применение этих методов позволяет обеспечить длительное стабильное получение пучка протонов для проведения научных исследований.

Результаты исследований 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.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений, результатов исследования**

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами теоретического анализа и численного моделирования, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств, используемых в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом.

#### **Соответствие паспорту научной специальности**

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в области исследования «Получение пучков заряженных частиц, расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков» (п. 1, 2, 7 паспорта специальности).

## **Апробация работы**

Результаты работы, изложенные в тексте диссертации, докладывались на 5 международных и 2 российских конференциях, а также были опубликованы в 15 научных трудах, 7 из которых входят в перечень ВАК.

## **Замечания по диссертационной работе**

1. Автором в обзоре подробно рассмотрены различные виды представления эмиттанса. Однако в результатах измерений, приводимых в работе, не уточняется, приводятся ли значения нормализованного полного эмиттанса или же среднеквадратичного (т.н. rms эмиттанса). Также хотелось бы уточнить, множитель  $\pi$ , обычно используемый в единицах измерения эмиттанса, опущен или учитывается в представленных значениях.

2. При обзоре эмиттанса я рекомендовал бы автору следовать классической схеме и начинать обзор с теоремы Лиувилля о постоянстве фазового объема в консервативной системе сил.

3. Автором приведен и проанализирован обширный экспериментальный результат. Сравнение полученных данных с результатами моделирования динамики пучка сильно обогатили бы работу. Однако такое сравнение приведено только при анализе ускорения пучка ионов аргона, получаемых в результате ионизации рабочего газа обдирочной мишени. Особенно это целесообразно для подтверждения рекомендации по увеличению зазоров между электродами ускорительного тракта. Пока эта рекомендация отталкивается только от желания увеличения электрической прочности зазоров. Также моделирование динамик пучка позволило бы более аргументировано обосновать тезис о необходимости «перефокусировки» пучка отрицательных ионов водорода на входе в ускоритель-тандем, а также выводы по компенсации собственного заряда пучка.

4. Увеличение размера и эмиттанса пучка отрицательных ионов с ростом тока пучка может быть обусловлено изменением плазменной границы в ионном источнике, а не только собственным зарядом пучка. Что из двух процессов является доминирующим требует детального изучения.

Впрочем, отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования, они не влияют на главные результаты диссертации.

### Заключение

Диссертационная работа Колесникова Я.А. «Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Кулевой Тимур Вячеславович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Колесникова Ярослава Александровича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Заместитель директора по научной работе по ускорительному направлению  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
доктор технических наук (01.04.04 – Физическая электроника)



Кулевой Тимур Вячеславович  
07.11.2022

Адрес: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
Тел.: +7 (499) 196-95-39  
Эл. почта: Kulevoy@itep.ru

Подпись Кулевого Т.В. удостоверяю  
Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»



К.А. Сергунова