

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук

**Коваля Николая Николаевича**

на диссертационную работу

**Колесникова Ярослава Александровича**

**«Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией»,**

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертационная работа Я.А. Колесникова посвящена получению ускоренного пучка протонов в электростатическом тандемном ускорителе заряженных частиц оригинальной конструкции, названном ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией. Изучение физических процессов в новом типе ускорителя заряженных частиц уже само по себе актуально, т.к. позволяет оптимизировать его работу и улучшить параметры. Дополнительную и главную **актуальность исследованиям** придает ее цель – использование ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией в составе ускорительного источника эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии лечения злокачественных опухолей (БНЗТ), как одного из наиболее перспективных, но труднореализуемых высокотехнологичных методов. Данная работа позволит приблизить внедрение БНЗТ в медицинскую практику.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 149 страниц текста, 84 иллюстрации, 6 таблиц, список литературы включает 104 наименования. Диссертация хорошо структурирована, написана ясно и просто, полученные результаты легко воспринимаются и понимаются.

Содержание **автореферата** соответствует содержанию диссертации.

**Во введении** обоснована актуальность, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

**В первой главе** приведен анализ современного состояния развития методов диагностики тока, размера и фазового портрета мощных стационарных пучков

ионов, рассмотрена их применимость для проведения исследований на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией, уточнены цели и задачи диссертационной работы и обоснован выбор конкретных диагностических методик. Обращено внимание на методы измерения фазового портрета и вычисления нормализованного эмиттанса, как геометрического, так и среднеквадратичного (RMS-эмиттанс).

**Во второй главе** приведено краткое описание ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, отмечены его особенности и указано, за счет каких технических решений достигнут прогресс в увеличении тока пучка ионов. Подчеркнуто, что в результате проведенного исследования достигнуты параметры пучка протонов (энергия и ток), требуемые для БНЗТ, и обеспечено достаточно длительное стабильное получение пучка протонов или дейтронов для широкого спектра других приложений: от изучения радиационного блистеринга до измерения сечений ядерных реакций, от измерения толщины литиевого слоя на нейтроногенерирующей мишени до радиационного тестирования перспективных конструкционных материалов. По ходу ознакомления с диссертацией становится ясным, что соискатель успешно справляется с поставленной ему задачей, и все перечисленные приложения ускорителя и освоенные режимы его работы стали в значительной степени результатом тщательно проведенных исследований, представленных в диссертационной работе.

В следующих трех главах диссертационной работы представлены конкретные результаты проведенных исследований. Следует обратить внимание на большое количество разработанных и используемых диагностических средств, добавляющих достоверности полученным результатам и уточняющих физику работы ускорителя.

**В третьей главе** диссертационной работы представлены результаты исследования инжекции пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель. Отмечено, что перед началом проведенных исследований достоверные данные о влиянии пространственного заряда на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода отсутствовали, и при проведении численного моделирования предполагали отсутствие влияния заряда. Соискателем разработаны диагностические средства измерения параметров пучка ионов, экспериментально продемонстрирована неполная компенсация заряда ионов и реализован сценарий оптимальной инжекции пучка ионов в ускоритель. Особо следует отметить высокую точность измерения фазового портрета пучка ионов и применение оптических видеокамер с высокой светосилой и чувствительной матрицей для визуализации пучка ионов, что превращает дополнительный

напуск обдирочного газа в тандемных ускорителях из недостатка в достоинство, улучшающее его работу.

**Четвертая глава** посвящена детальному и всестороннему изучению и измерению первичных и вторичных потоков заряженных частиц в ускорителе, а также потока нейтральных частиц. Как и в предыдущей главе сначала приведено краткое, но вполне понятное описание цели исследования. Затем описаны разработанные средства диагностики и результаты, полученные с их использованием. Пристальное внимание уделено измерению величины потока ионов аргона, которые вытекают из газовой обдирочной мишени в ускорительный канал и могут критически неприемлемо нагревать неохлаждаемые диафрагмы электродов ускорителя. Из представленного материала видно, что соискателем не только решена сложная задача измерения малого тока пучка ионов аргона, но и впервые дано объяснение, в результате какого технического решения достигнуто значительное подавление этого нежелательного потока вторичных заряженных частиц. Также в главе описан простой и красивый оптический метод, с помощью которого можно заглянуть внутрь обдирочной мишени и подкорректировать проведение пучка ионов через ускоритель, оптимизируя его параметры.

**Пятая глава** начинается с краткого описания проблем транспортировки пучка протонов (прожигание вакуумной камеры тракта, отсутствие диагностик) и постановки трех обоснованных задач исследования: транспортировка мощного пучка протонов без повреждения вакуумной камеры, разработка и внедрение средств измерения параметров пучка протонов, выяснение действия пространственного заряда пучка. Разработанные средства диагностики автором условно поделены на три части: для поддержания работоспособности установки, для оперативного контроля за параметрами протонного пучка, для измерения фазового портрета. Из первой группы отмечу то, что стандартный метод – использование охлаждаемых диафрагм для принятия и утилизации гало пучка, модернизирован, как пишет автор, до «термических аналогов пикап-электродов». Это позволяет, помимо предохранения элементов установки от прожигания, еще и контролировать степень фокусировки пучка отрицательных ионов водорода при их инжекции в ускоритель. Во второй группе средств диагностик можно выделить три новых, экзотических метода, основанных на взаимодействии пучка ионов с литиевой нейтроногенерирующей мишенью. Обращу внимание на один из оригинальных методов, когда автор измеряет профиль и размер протонного пучка, анализируя динамику распространения расплавленной области поверхности лития с увеличением мощности пучка протонов. Логическим завершением разработки средств диагностик является реализация метода *in situ* измерения фазового портрета мощного стационарного

пучка протонов, позволившая в деталях изучить и оптимизировать получение пучка протонов в широком диапазоне измерения его параметров.

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

**Научная новизна диссертационной работы** не вызывает сомнений, она содержит результаты, полученные впервые: достоверные данные о влиянии пространственного заряда на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода и пучка протонов, измерение тока ионов аргона, *in situ* измерение эффективности газовой обдирочной мишени.

**Научная и практическая значимость полученных результатов** также не вызывает сомнений. Первый экспериментальный образец ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, судя по большому количеству свежих публикаций в научных изданиях, выведен в режим его эффективного использования: он стал инструментом разработки методики БНЗТ, инструментом получения фундаментальных знаний о ряде сечений ядерных реакций, инструментом, востребованным коллективами таких крупнейших физических установок мира как ИТЭР и ЦЕРН. Еще более важно то, что этот ускоритель стал прототипом медицинских установок, одна из которых сделана для первой клиники БНЗТ в Китае, а вторая делается для НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина в Москве.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования** подтверждается систематическим характером исследований, использованием в ряде случаев независимых дублирующих экспериментальных методик, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами теоретического анализа и численного моделирования, практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств, используемых в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом.

Содержание диссертационной работы **соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника** в областях исследования «получение пучков заряженных частиц, расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков», «расчетно-теоретические аспекты формирования и транспортировки пучков заряженных частиц» и «расчетно-теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий пучков заряженных частиц с электромагнитными полями, друг с другом, с молекулами остаточного газа и мишенями» (пункты 1, 2 и 7 паспорта специальности).

Результаты диссертационной работы опубликованы в 15 научных статьях и представлялись на 5 международных и 2 российских конференциях в виде 18

докладов. Исследования по теме диссертационной работы поддержаны грантами РНФ и РФФИ.

Замечания и вопросы по диссертационной работе:

1. В целях и задачах диссертационного исследования указан «диапазон значений энергии и тока (от 0,6 до 2,3 МэВ, от 0,5 до 10 мА)», в котором планировалось осуществить исследования ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и «обеспечить длительное (не менее 1ч.) стабильное получение пучка протонов и дейтронов», однако основные исследования были проведены при более «скромных» параметрах, а предельные достигнутые параметры (в виде характеристик и зависимостей) в диссертации не обозначены. Вопрос: в чём основная причина такого несоответствия и достижима ли длительная стабильная работа исследуемого ускорителя на предельных параметрах?

2. Смущает скудное описание широкого набора внедренных и использованных соискателем диагностических средств – зачастую приведены рассуждения «на пальцах», не подкрепленные рядом математических выкладок и оценок. С другой стороны, подробное физическое и техническое описание внедренных средств диагностики могло бы существенно увеличить и так немалый объем текста кандидатской диссертации.

3. На стр. 43 пункт 6 при описании созданного ускорителя-тандема автор пишет: «Ускоритель не является приобретённым оборудованием; фактически он является самодельным оборудованием...». Используемый термин «самодельное оборудование», на мой взгляд, неудачен. Это можно было бы отнести к каким-либо бытовым устройствам, а не к ускорителю мирового уровня, созданному уважаемым академическим институтом.

4. Несмотря на общий высокий уровень текста – как с точки зрения физики, так и с точки зрения русского языка – в оглавлении диссертации и на стр. 40 присутствуют опечатки.

Сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость и общую крайне положительную оценку диссертационной работы Я.А. Колесникова.

В заключение следует отметить, что диссертационная работа Колесникова Ярослава Александровича «Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией» представляет собой решение актуальной научной проблемы, имеющей важное практическое значение для создания эффективного отечественного ускорительного оборудования. Выводы и заключения по результатам исследований обоснованы. Диссертационная работа по своей актуальности, научной новизне, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов 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, Коваль Николай Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Колесникова Ярослава Александровича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор технических наук (05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника), профессор по кафедре физики плазмы, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 634055, г. Томск, проспект Академический, д. 2/3

тел. +7 (3822) 49-27-92, эл. почта: [koval@opee.hcei.tsc.ru](mailto:koval@opee.hcei.tsc.ru)

10 ноября 2022 г.



Коваль Николай Николаевич

Подпись Н.Н. Ковалья удостоверяю.

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН, к.т.н.

Васильевна



Крысина Ольга