

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИСЭ СО РАН,

член-корр. РАН

Н.А. Ратахин

«13» ноября 2014 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Сорокина Игоря Николаевича** «**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ПРОЧНОСТЬ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности "01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики"

Актуальность диссертационной работы Сорокина И.Н. обусловлена расширением областей использования ускорителей заряженных частиц в медицине. Стационарные пучки протонов с энергией около 1,9 МэВ позволяют путём облучения литиевой мишени создать источник нейтронов с энергией около 40 кэВ для так называемой бор-нейтронозахватной терапии, перспективной для лечения ряда злокачественных опухолей. Снижение рабочего напряжения ускорителя позволяет уменьшить его габариты и стоимость, повысить надёжность. Этому отвечает построение ускорителя по принципу тандема: вначале электростатическим способом ускоряется отрицательный ион, затем он проходит область перезарядки внутри полого высоковольтного электрода, превращается в положительный ион и ускоряется в следующих по ходу движения зазорах до энергии, соответствующей удвоенному напряжению. Однако, несмотря на то, что ускоряющее напряжение в ускорителе-тандеме вдвое ниже, тем не менее, его абсолютная величина весьма велика (1 МВ!), что требует больших усилий по поиску методов надёжного обеспечения высокой электрической прочности на постоянном напряжении.

Диссертация Сорокина И.Н. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 55 наименований, изложена на 108 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка и 6 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи, приведены сведения о научных публикациях по теме диссертации, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе приводится обзор экспериментальных результатов по высоковольтной прочности вакуумных зазоров, известных из литературы, а также в деталях описаны принцип действия и конструкция созданного электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией для получения протонного пучка с энергией 2 МэВ.

Вторая глава посвящена выбору количества ускоряющих зазоров. Во время эксплуатации установки пробой высоковольтных вакуумных зазоров неизбежны. На режим тренировки последовательными пробоями и конечную электрическую прочность вакуумных зазоров существенно влияет энергия, запасаемая как в емкостях высоковольтных зазоров и связанных с ними емкостях других элементов ускорителя,

так и в выходной емкости высоковольтного источника. Перенапряжение на отдельных элементах ускорителя может привести к их последовательному пробое и к потере электрической прочности. В конечном итоге, автором отдано предпочтение 6-зазорному варианту ускорителя-тандема.

В третьей главе представлены результаты экспериментов, проведенных на специально изготовленном стенде с 45-мм вакуумным зазором и площадью высоковольтного электрода $0,71 \text{ м}^2$ для проверки параметров, закладываемых в основные высоковольтные элементы ускорителя. Изучено влияние запасенной энергии на электрическую прочность вакуумного зазора.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов по достижению требуемого напряжения на созданном 6-зазорном ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией, который характеризуется площадью поверхности электродов в десятки квадратных метров. Была разработана методика и осуществлена позазорная тренировка ускоряющих зазоров, что позволило достичь средней напряженности электрического поля в них до 30 кВ/см при запасенной энергии до 26 Дж , получить требуемое напряжение ускорителя 1 МВ уже на 5-ти зазорах и обеспечить устойчивую работу ускорителя без пробоев на 6-ти зазорах в течение нескольких часов.

Пятая глава посвящена изучению темнового тока в ускоряющих высоковольтных вакуумных зазорах, который может привести к нарушению равномерности распределения напряжения в них. Представлены результаты измерений временного поведения темнового тока. Предприняты меры по подавлению автоэлектронного тока в области диафрагм, через которые проходит пучок.

В шестой главе приведены данные о радиационной обстановке вблизи ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Представлены результаты расчетной и измеренной мощности дозы тормозного излучения, а также измеренный спектр излучения. Подтверждено, что причиной тормозного излучения является темновой ток. Выяснено, что проведение тренировки ускорителя позволяет снизить мощность дозы рентгеновского излучения с начальных единиц миллизиверт в час на расстоянии 2 м от ускорителя до единиц микрозиверт в час, т.е. на три порядка величины.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Получены новые экспериментальные данные о высоковольтной прочности и величине темнового тока 45-мм вакуумного зазора с площадью высоковольтного электрода $0,71 \text{ м}^2$ при запасенной энергии до 50 Дж и 66-мм вакуумных зазоров ускорителя-тандема с электродами общей площадью 41 м^2 при запасенной в каждом зазоре энергии до 26 Дж .
2. Предложен и реализован способ позазорной тренировки электродной сборки, исследовано распределение давления рабочего газа в области перезарядной обдирочной газовой мишени.
3. Изучено поведение темнового тока и рентгеновского излучения в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией и разработаны меры по их значительному снижению.

Практическая значимость полученных автором результатов не вызывает сомнений. На основании полученных экспериментальных данных в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН уже создан и успешно функционирует ускоритель заряженных частиц нового типа – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для источника эпитепловых нейтронов с целью проведения экспериментов по бор-нейтронозахватной терапии.

Результаты и выводы диссертационной работы И.Н. Сорокина могут использоваться при проектировании и изготовлении высоковольтных элементов ускорителей заряженных частиц, имеющих спрос в медицине и других областях науки, где используются пучки ионов. В частности, полученные данные о величине запасенной энергии, не приводящей к падению электрической прочности вакуумных зазоров, и/или способы уменьшения темнового тока, могут быть применены в таких организациях как Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (Санкт-Петербург), ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского (Обнинск), Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина (Москва), Национальный институт Сан-Мартина (Аргентина), где разрабатывается ускоритель-тандем с электростатическими квадрупольями и с электродами площадью несколько квадратных метров. Данные о приемлемой величине напряженности электрического поля в вакуумном зазоре могут использоваться в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) для проектирования инжектора ионов.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается систематическим и комплексным характером исследований, тщательными подготовкой и проведением экспериментов, использованием дублирующих методик при проведении измерений, удовлетворительным соответствием экспериментальных данных результатам расчётов и оценок, литературным данным.

Апробация работы

Работа хорошо апробирована. Её результаты неоднократно докладывались на авторитетных Всероссийских и Международных научных форумах; они опубликованы в 25 научных работах, из которых 8 статей в рекомендованных ВАК российских рецензируемых научных журналах, 14 – в трудах российских и международных научных конференций.

Автореферат, в целом, верно отражает содержание и выводы диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

Замечания общего характера

1. Из Введения трудно понять принципы, положенные в основу ускорителя-тандема. В диссертации принцип действия даётся лишь в § 1.2 при описании конкретного ускорителя, в создании которого участвовал автор. Между тем, начинать следовало бы с идей.
2. Нет обоснования по выбору напряжения, сорта ионов для создания генератора нейтронов с нужными параметрами. Также нет обоснования почему для получения протонного пучка предлагается именно электростатический ускоритель-тандем, а не, например, линейный индукционный ускоритель?
3. Обработка экспериментальных зависимостей ограничивается их усреднением и аппроксимацией без их анализа с позиций закономерностей вакуумного пробоя, известных из литературы.

Замечания частного характера

1. Раздел Введение, страница 5. Не понятен смысл слова "новаторский".
2. Литературный обзор (параграф 1.1) не имеет строгой последовательности. На первом месте даны экспериментальные данные 1947 года по электрической прочности

вакуумного промежутка в электродной системе «шар – диск» (в чем нет необходимости при тех соотношениях кривизны электродов и межэлектродных расстояний, которые имеют место в ускорителе). Далее рассматривается влияние давления газов на электрическую прочность промежутков, после чего следует возврат к вакуумным условиям, но уже в системе электродов малой кривизны. Автор несколько категорично утверждает, что приведенные данные «...не позволяют прогнозировать высоковольтную прочность сантиметровых вакуумных зазоров для проектируемого ускорителя-тандема с площадью электродов в десятки квадратных метров...». Однако, с одной стороны, приведенные на сводном графике и в таблице литературные данные ограничены диапазоном опубликования 50-х–70-х годов прошлого века. С другой стороны, даже на основе приведенных данных возможны попытки экстраполяции в отношении электрической прочности проектируемого изделия. В этой связи, ценным в работе было бы как подтверждение, так и, напротив, выявление отклонений от выработанных годами многими исследователями общих закономерностей, связанных с зависимостью пробивного напряжения от ширины зазора и от площади электродов.

3. Непонятна степень готовности ускорителя. Например, на стр. 14 встречается фраза «... для проектируемого ускорителя-тандема...», а через абзац другая фраза «...В конструкции созданного электростатического ускорителя...». Если речь идет о разных устройствах, следует дать разъяснения по поводу преимуществ создаваемого ускорителя по отношению к уже функционирующему.

4. В параграфе 1.2 достаточно подробно описывается конструкция ускорителя-тандема. В то же время, в рамках изложения нет информации о месте входа и выхода пучка, его ориентации относительно обдирочной мишени, способах получения отрицательных ионов водорода и способах конверсии протонного пучка в нейтронный. Несмотря на то, что эти составляющие выходят за рамки основной работы соискателя, правильно было бы дать соответствующие пояснения в нескольких фразах со ссылками на уже опубликованные работы.

5. Автор заявляет, что из графика на рисунке 3б видно, что при рабочей напряженности ускорителя-тандема темновой ток практически равен нулю. На самом деле, ток остается на уровне микроампера, а количественных критериев, на основе которых этим током можно было бы пренебречь, нет (выделяемая мощность, сравнение с критическими режимами и проч.). Полезно было бы изобразить столь сильную зависимость в логарифмическом масштабе для выявления характерных участков вольтамперной характеристики и, если возможно, механизмов проводимости, соответствующих этим участкам.

Указанные замечания не перечёркивают, однако, полученных в диссертационной работе результатов и общего положительного впечатления от неё. Решена актуальная научно-техническая задача по разработке и созданию системы формирования пучка протонов с энергией до 2 МэВ ускорителя-тандема, в котором как первая, так и последняя транспортировочные диафрагмы находятся под потенциалом земли и в котором ускоряющее напряжение составляет половинное значение по отношению к энергии ионов; при этом диэлектрические детали секционированного изолятора выведены далеко за пределы области транспортировки пучка и надёжно защищены от попадания на них рассеянных частиц.

Таким образом, диссертация Сорокина И.Н. может быть квалифицирована как законченная научная работа, выполненная на высоком уровне и соответствующая требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор

заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности "01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики".

Отзыв составлен с учетом мнений и замечаний, высказанных сотрудниками на научном семинаре ИСЭ СО РАН, состоявшемся 12 ноября 2014 г. (протокол № 9).

В.н.с. лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН,


доктор технических наук



Озур Г.Е.

С.н.с. лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН,

кандидат физ.-мат. наук



Нефёдцев Е.В.