

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Г.Е. Ремнева
на диссертацию **Сорокина Игоря Николаевича**
«Высоковольтная прочность ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики».

Актуальность темы. Диссертационная работа Сорокина Игоря Николаевич посвящена исследованию и изложению результатов решения проблемы достижения требуемой электрической прочности элементов конструкции «ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией». Применение перспективной методики лечения злокачественных новообразований - бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), испытания которой проходили на ядерных реакторах, привело к необходимости создания компактного альтернативного источника нейтронов на основе электростатического ускорителя, с возможностью использования его непосредственно в медицинских клиниках.

Предлагаемая конструкция ускорителя-тандема имеет характерные особенности: отсутствие ускорительных трубок, обычно применяемых в электростатических ускорителях; значительная площадь электродов в десятки квадратных метров и, как следствие, значительная величина запасенной энергии в вакуумные зазоры (десятки джоулей); высокий темп ускорения заряженных частиц (2,5МэВ/м).

Задача по получению экспериментальных данных по электрической прочности многоэлектродных вакуумных систем с высокой площадью поверхности явилась **актуальной** и успешно решена диссертантом. Полученные результаты позволили обеспечить стабильную без пробоев работу ускорителя на требуемом ускоряющем напряжении 1 МВ. Таким образом, проведенные И.Н. Сорокиным исследования, послужили основанием для применения новых конструктивных решений при создании ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

Новизна. Прделана значительная научно-исследовательская работа, в которой автор принимал непосредственное участие. Конструкция ускорителя-тандема достаточно уникальна. Значительная часть результатов диссертации, полученных в экспериментах, являются оригинальными, полученными впервые.

В качестве основных результатов работы Сорокина И.Н. можно отметить следующие:

1. Впервые получены экспериментальные данные об электрической прочности и величине темнового тока на стенде с площадью высоковольтного электрода $0,71 \text{ м}^2$, вакуумным зазором 45 мм при запасенной энергии до 50 Дж и на ускорителе-тандеме с электродами общей площадью 41 м^2 , 66-мм вакуумными зазорами при запасенной энергии до 26 Дж.

2. Предложен и реализован способ последовательно соединяемых высоковольтных вакуумных зазоров ускорителя-тандема.
3. Впервые исследовано поведение темнового тока и рентгеновского излучения в многоэлектродной системе вакуумных зазоров ускорителя-тандема.

Степень обоснованности научных положений, практическая значимость и достоверность результатов работы не вызывает сомнений. В результате проведенных расчетов и экспериментальных исследований был создан и успешно функционирует ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для компактного источника нейтронов, на котором проводятся экспериментальные исследования. На созданном ускорителе достигнуто требуемое ускоряющее напряжение 1 МВ.

Результаты проведенных исследований, несомненно, могут найти применение в разработках высоковольтных элементов и конструкций ускорителей заряженных частиц различных типов.

Основные результаты работы неоднократно представлялись на международных и национальных конференциях. По результатам диссертации опубликовано 8 научных работ в российских рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во введении отмечается перспективность и необходимость создания компактного источника нейтронов на основе ионного ускорителя для медицинских клиник. Обозначены основные особенности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Сформулированы цели и задачи работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору экспериментальных данных о пробивных напряжениях вакуумных зазоров для простейших двухэлектродных систем с электродами значительно меньшей площадью. Описывается конструкция созданного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

Во второй главе приводятся оценочные расчеты запасенной в зазорах энергии и перенапряжений 4-, 6- и 12- зазорного варианта ускорителя-тандема. Обосновывается выбор 6-зазорного варианта, как более технологически простого и менее дорогостоящего.

Третья глава посвящена исследованиям, проведенным на однозазорном стенде с площадью высоковольтного электрода $0,71 \text{ м}^2$ и 45-мм вакуумным зазором. Утверждается, что запасенная энергия до 50 Дж и инжекция перезарядного газа при определенных величинах давления не приводят к потере электрической прочности вакуумного зазора.

В четвертой главе описывается устройство для тренировки, как отдельных, так и последовательно соединяемых вакуумных зазоров. Представлены экспериментальные данные подъема напряжения на ускорителе-тандеме. В результате экспериментов по достижению требуемой величины ускоряющего напряжения 1 МВ на созданном 6-зазорном ускорителе-тандеме. При проведении тренировки зазоров достигнута средняя рабочая напряженность электрического поля в ускоряющих зазорах 30 кВ/см при запасенной

энергии до 26 Дж. Обеспечена работа без пробоев ускорителя на напряжении 1 МВ в течение нескольких часов.

В пятой главе исследуется поведение темнового тока в ускоряющих вакуумных зазорах. Предложен способ определения его величины. Показана динамика значительного снижению темнового тока за время от одного до двух часов. Предложены и апробированы конструктивные решения по оптимизации геометрии ускорительного канала.

В шестой главе приведены результаты расчетной и измеренной мощности поглощенной дозы тормозного излучения, а также измеренный спектр излучения. Утверждается, что причиной тормозного излучения является темновой ток. Показано, что тренировка вакуумных зазоров снижает мощность дозы рентгеновского излучения до безопасных значений на расстоянии 2 м от ускорителя-тандема.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Диссертация написана лаконичным и понятным языком, содержит ясные графики и схемы.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. Структура диссертации в части разбития на главы не является, на мой взгляд, оптимальной. Некоторые главы могли бы быть объединены, например 2,3 и 5.
2. В параграфе 6.1.2, с. 85 автор при расчете экспозиционной дозы рентгеновского излучения определяет величину тока переносимого электронами – между пробоями из исходного напряжения в 50 кВ и запасаемой энергии 70 Дж. Подтверждения о том, что эта запасенная энергия выделена именно в электронном пучке нет.
3. Автор связывает повышенное значение темного тока с автоэмиссионным током. Необходимого обоснования этому утверждению в диссертации не содержится. Вероятней всего, поскольку видны пробои вакуумных промежутков, это генерация импульсных электронных пучков наносекундной длительности в начальной стадии развития вакуумного пробоя. Автор справедливо уделяет значительное внимание влиянию величины межэлектродной емкости ~ 10 Дж и выше. Почему он не связывает эти факторы не совсем ясно. К этому можно также добавить отсутствие в анализе литературных источников работ по взрывной электронной эмиссии – начальной стадии вакуумного пробоя, генерации импульсных электронных пучков на её основе.
4. В диссертации имеются некоторые опечатки и жаргонные термины:
«Выстойка под напряжением», с.64; «осаждение тока пучка на ускоряющие....», с.72;
«Изменение вакуума», с.64.

Однако данные замечания не снижают положительной оценки работы, важности полученных результатов. Диссертация И.Н. Сорокина является законченным научным и экспериментальным исследованием, выполненным автором на высоком научном уровне, и вносит важный вклад в исследования электрической прочности вакуумных промежутков. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что рецензируемая работа «ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ПРОЧНОСТЬ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ» отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - Игорь Николаевич Сорокин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 - "Приборы и методы экспериментальной физики".

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор

Г.Е. Ремнев

Заведующий лабораторией №1 Института физики высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Адрес: Томск 50, пр. Ленина 30.

Рабочий телефон: 83822419158

Электронный адрес: remnev@tpu.ru

« 8 » декабря 2014 г.

Подпись Г.Е. Ремнева удостоверяю.

Ученый секретарь Национального исследовательского Томский политехнического университета



О.А. Ананьева