

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук А.В. Бутенко  
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».

Диссертационная работа Сорокина Игоря Николаевича «Высоковольтная прочность ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация посвящена исследованию и решению проблемы достижения требуемой высоковольтной прочности, предложенного в 1998 году Институтом ядерной физики СО РАН нового типа ускорителя – «ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией». **Актуальность работы** обусловлена желанием создать на основе электростатического ускорителя компактный, безопасный и надежный источник нейтронов, который мог бы широко применяться в медицинских клиниках, как альтернативу ядерным реакторам, на которых проводились клинические испытания перспективной методики лечения злокачественных новообразований – бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

Особенностями данного электростатического ускорителя тандемного типа являются: отсутствие ускорительных трубок, применяемых в традиционных электростатических ускорителях прямого действия; большая площадь электродов (десятки квадратных метров); большая запасенная энергия в сантиметровых вакуумных зазорах (десятки джоулей); высокий темп ускорения заряженных частиц.

Результаты исследований, проведенных И.Н. Сорокиным, легли в основу принятых конструктивных решений при создании ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и позволили обеспечить необходимую электрическую прочность при работе ускорителя на напряжении 1 МВ. Таким образом, получение экспериментальных данных об электрической прочности подобных многоэлектродных систем с большой площадью поверхности безусловно явилось **актуальной** задачей, успешно решенной диссертантом.

**Степень обоснованности научных положений, достоверность результатов, новизна и практическая значимость** работы не вызывает сомнений. На основании полученных экспериментальных данных и численных расчетов создан действующий ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для источника тепловых нейтронов. На созданном ускорителе достигнуто требуемое напряжение 1 МВ.

Проделана очень большая работа, в которой автор принимал непосредственное участие на всех стадиях создания ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и при получении экспериментальных результатов.

Конструкция ускорителя-тандема уникальна и не имеет аналогов. Все научные результаты, полученные в экспериментах, являются новыми.

В результате проведенных исследований впервые получены 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 на экспериментальном стенде и
- 66-мм вакуумных зазоров ускорителя-тандема с электродами общей площадью  $41 \text{ м}^2$  при запасенной энергии до 26 Дж.

Исследовано распределение давления перезарядного газа в области обдирочной газовой мишени.

Предложен и реализован способ как отдельных, так и последовательно соединяемых высоковольтных вакуумных зазоров ускорителя-тандема.

Впервые изучено поведение темнового тока и рентгеновского излучения в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией.

Полученные результаты могут быть использованы в разрабатываемых ускорительных системах для БНЗТ, а также при проектировании и эксплуатации других типов ускорителей заряженных частиц.

Основные результаты работы неоднократно представлялись на международных и национальных конференциях. По результатам диссертации опубликовано 25 научных работ, 8 из которых в рекомендованных ВАК российских рецензируемых научных журналах.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 108 страниц, включая 82 рисунков, 6 таблиц и библиографический список литературы из 55 наименований.

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

В первой главе приводится обзор экспериментальных результатов по высоковольтной прочности вакуумных зазоров и в деталях описана конструкция созданного электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией для получения протонного пучка с энергией 2 МэВ.

Вторая глава посвящена выбору количества ускоряющих зазоров. Приведены оценочные значения энергий, запасаемых в межэлектродных емкостях и связанных с ними соответствующих емкостях стеклянных и керамических колец проходного изолятора, в зависимости от числа вакуумных зазоров. Проведены расчеты перенапряжения на 4-, 6- и 12-ти вакуумных промежутках при пробое по полному напряжению и отдельных вакуумных зазоров. Обоснован выбор, сделанный в пользу 6-зазорного варианта 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 и конструктивных решений,

закладываемых в основные элементы ускорителя. Доказано, что запасенная энергия до 50 Дж и перезарядный газ не приводят к потере электрической прочности вакуумного зазора.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов по достижению требуемого напряжения 1 МВ на созданном 6-зазорном ускорителе-тандеме. Проведение позазорной тренировки позволило достичь средней напряженности электрического поля в ускоряющих высоковольтных вакуумных зазорах до 30 кВ/см при запасенной энергии до 26 Дж, получить требуемое напряжение ускорителя 1 МВ 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 зазорах. Выяснено, что стабилизация напряжения на требуемом уровне в течение 1÷2 часов приводит к снижению темнового тока с нескольких сотен микроампер до приемлемых низких величин. Предложенные конструктивные решения по оптимизации геометрии ускорительного канала позволили полностью устранить эффект возникновения автоэмиссионного тока.

В шестой главе приведены данные о радиационной обстановке вблизи установки. Представлены результаты расчетной и измеренной мощности дозы тормозного излучения, а также измеренный спектр излучения. Подтверждено, что причиной тормозного излучения является темновой ток. Показано, что проведение тренировки ускорителя в течение 1 ÷ 2 часов позволяет снизить мощность дозы рентгеновского излучения с начальных единиц мЗв/ч на расстоянии 2 м от ускорителя до единиц мкЗв/ч.

В Заключение приведены основные результаты работы.

Язык диссертации лаконичен и понятен, приведенные графические материалы хорошо дополняют текст.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. Не очевидно, чем обусловлен выбор напряжения 1 МВ для ускорителя-тандема. Следовало бы дать соответствующие пояснения.
2. На рис. 3 изображена осевая линия, но не помечено, что это ось ускоряемого пучка. Было бы полезно обозначить место ввода и вывода пучка.
3. Не достаточно внимания уделено описанию технологии подготовки поверхностей высоковольтных электродов.
4. В диссертации имеется ряд опечаток и недостатков оформления:
  - так в тексте давление приводится в единицах паскалей, за исключением стр. 25 и 57, где давление выражено в атмосферах.
  - часть подписи к графику 57 (стр. 69) меньшего размера, чем основной текст.
  - в главе 5 (стр. 72) указан «земляной» электрод, хотя во всем тексте употребляется термин «заземленный».

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не снижают положительной оценки работы. Диссертация И.Н. Сорокина является законченным научным исследованием, выполненным автором на высоком научном уровне. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации и позволяет составить достаточно объективное представление о проделанной работе в целом.

Актуальность темы, объём выполненных исследований, а также научная и практическая значимость полученных результатов позволяют утверждать, что рецензируемая работа 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,  
кандидат технических наук  
начальник Ускорительного отделения



28.11.14

А.В. Бутенко

Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина  
Объединенного института ядерных исследований

Адрес: г.Дубна, ул. Жолио-Кюри 6, ЛФВЭ

Рабочий телефон: 84962163722

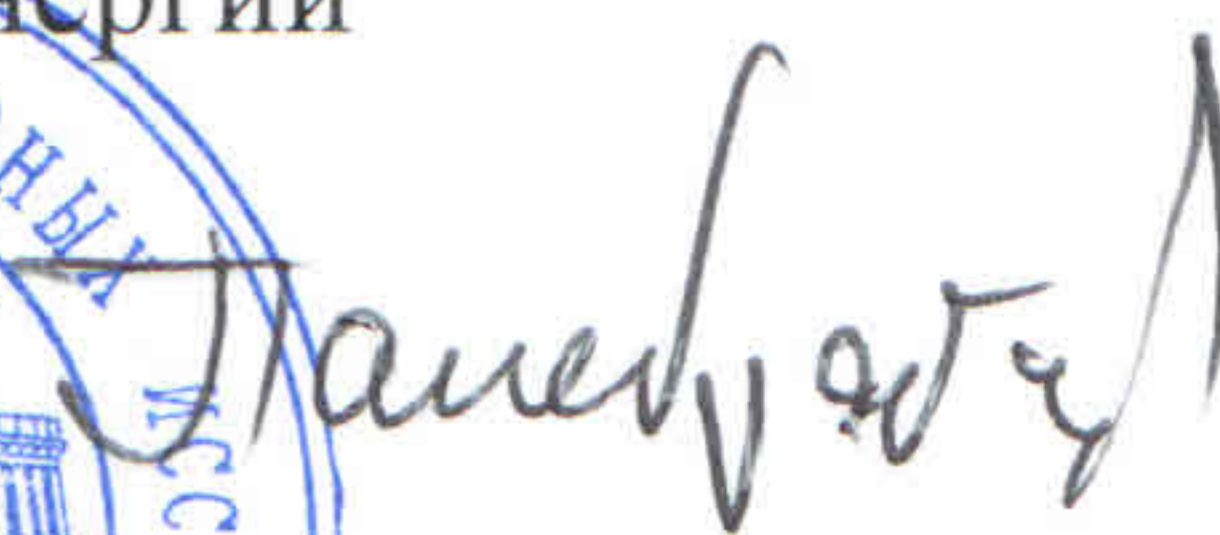
Электронный адрес: [butenko@jinr.ru](mailto:butenko@jinr.ru)

«28» ноября 2014 г.

Подпись А.В. Бутенко удостоверяю.

Ученый секретарь Лаборатории физики высоких энергий  
имени В.И.Векслера и А.М.Балдина ОИЯИ

Кандидат физико-математических наук



Д.В. Пешехонов