

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.162.02, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
подведомственного Минобрнауки России, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 10.10.2023 № 14

О присуждении **Сандалову Евгению Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени **кандидата физико-математических наук**.

Диссертация «**Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям**» по специальности **1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника** принята к защите 29.06.2023 (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.1.162.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России, 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 11, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Сандалов Евгений Сергеевич, «20» июля 1994 года рождения, работает научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственном Минобрнауки России.

В 2018 году соискатель окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», а в 2022 году – аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Лаборатории 10 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Сеницкий Станислав Леонидович, старший научный сотрудник лаборатории 10 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Запевалов Владимир Евгеньевич – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», заведующий лабораторией гиротронов для термоядерных исследований;

2. Лебедев Валерий Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина, заместитель начальника ускорительного отделения по научной работе

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, в своем положительном отзыве, подписанном Яландиным Михаилом Ивановичем, доктором технических наук, профессором, академиком РАН, главным научным сотрудником лаборатории электронных ускорителей, и Шпаком Валерием Григорьевичем, доктором технических наук, академиком РАН, заведующим лабораторией электронных ускорителей, указала, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу с хорошим научным уровнем. Результаты, полученные в диссертационной работе (методы подавления колебаний пучка), несомненно, будут использованы при разработке подобных ускорительных комплексов. Разработанная модель для расчета поперечной неустойчивости электронного пучка позволит изучать и предсказывать ее динамику и в других ускорителях электронов. Диссертация Сандалова Е.С. «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Сандалов Евгений Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Соискатель имеет 65 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в научных журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, или в научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных цитирования Scopus, опубликовано 3 работы. Работы посвящены исследованиям в области физики сильноточных электронных пучков. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Исследование инкремента поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения в терагерцовом ЛСЭ / Е. С. Сандалов, С. Л. Синицкий, Д. И. Сковородин [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 16–29. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29> (дата обращения: 16.01.2023).
2. Исследование поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе / Е. С. Сандалов,

С. Л. Сеницкий, Д. И. Сквородин [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 5–22. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22> (дата обращения: 24.05.2022).

3. Electrodynamic system of the linear induction accelerator module / E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, A. V. Burdakov [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – Vol. 49, nr 2. – P. 718–728. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9321703>. – Дата публикации: 13.01.2021.

Вклад соискателя ученой степени в работы по теме диссертации является определяющим. Авторский вклад соискателя в материалах статьи 1 и 2 заключается в разработке численной модели для расчета динамики поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка ЛИУ, а также в проведении экспериментов по измерению инкремента этой неустойчивости для сопоставления с результатами моделирования. На основе экспериментальных данных и результатов моделирования, полученных соискателем, были выявлены основные закономерности развития поперечной неустойчивости пучка в различных режимах работы ЛИУ, а также предложено несколько способов ее подавления. Авторский вклад соискателя в статье 3 заключается в проведении численного моделирования и «холодных» экспериментов (без пучка) по измерению электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ.

В диссертации соискателя ученой степени Сандалова Е.С. отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От официального оппонента Лебедева Валерия Анатольевича, доктора физико-математических наук, доцента, заместителя начальника ускорительного отделения по научной работе Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина Международной межправительственной организации Объединенного института ядерных исследований. В отзыве представлен краткий обзор диссертационной работы, подчеркиваются актуальность избранной темы и новизна полученных результатов, а также обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации. Отмечается, что работа выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, указанные в отзыве замечания и недостатки не умаляют ее достоинств. В заключении указано, что диссертация Сандалова Е.С. является научно-квалифицированной работой, в которой предложены и реализованы методы подавления поперечной неустойчивости в индукционном ускорителе, результаты исследований, без сомнения, полезны для развития техники и теории ускорителей заряженных частиц.
2. От официального оппонента Запезалова Владимира Евгеньевича, доктора физико-математических наук, доцента, заведующего лабораторией гиротронов для термоядерных исследований Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук». В отзыве кратко отражено содержание

диссертационной работы. Отдельно обсуждается научная новизна и актуальность проведенного исследования, также подчеркивается обоснованность и достоверность полученных результатов. В отзыве имеется ряд замечаний, которые, как отмечено, не снижают научную и практическую значимость и общую хорошую оценку диссертационной работы. В заключении также указано, что диссертационная работа Сандалова Е.С. 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.

3. На автореферат поступил отзыв, подписанный Козыревым Андреем Владимировичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. В отзыве приведен краткий обзор основных результатов диссертации, отмечается актуальность работы, научная новизна и достоверность полученных результатов. В заключении отмечается, что диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, Сандалов Евгений Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по искомой специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой квалификацией в области физики сильноточных линейных ускорителей, способностью определить научную и практическую значимость диссертационного исследования, а также дать рекомендации по использованию полученных результатов. Их компетентность подтверждается большим количеством опубликованных теоретических и экспериментальных работ по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований **разработаны оригинальные и адаптированы** к конструкции модуля известные методы подавления поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе. **Проанализированы** спектральный состав возбуждаемых дипольных мод и инкременты поперечной неустойчивости в различных режимах транспортировки электронного пучка с килоамперным уровнем тока в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ), а также **проанализирована** возможность использования электронных пучков ЛИУ в качестве драйвера для лазера на свободных электронах. **Предложена и реализована** методика «холодных» (в отсутствии пучка) измерений электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ на основе дипольного излучателя, которая обеспечивает регистрацию наиболее неустойчивых дипольных мод с добротностью $Q \geq 10$. В теоретических и экспериментальных исследованиях **изучены** электродинамические свойства

ускорительных модулей ЛИУ, а также зависимости величины инкремента поперечной неустойчивости от параметров экспериментов. **Разработан** программный комплекс, позволяющий осуществлять моделирование динамики поперечной неустойчивости, основанный на разложении возбуждаемых пучком колебаний по собственным модам ускорительных модулей. Разработанный программный комплекс позволяет с точностью до 20% определить инкремент развития этой неустойчивости. **Показано**, что в ускорителе ЛИУ формируется пучок электронов с током 1,4 кА и энергией до 10 МэВ с амплитудой колебаний на выходе ускорителя, не превышающей 2 мм.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что был **предложен и развит** метод численного моделирования возбуждения и развития поперечной неустойчивости сильноточных релятивистских электронных пучков в ЛИУ с дискретной фокусирующей магнитной системой. **Исследованы** основные факторы, влияющие на инкремент неустойчивости, а также реализованы методы ее подавления на созданном ускорителе. Впервые **проведены** детальные теоретические и экспериментальные исследования поперечной неустойчивости пучка в созданном ЛИУ с дискретной фокусирующей магнитной системой.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что на реально действующем комплексе ЛИУ были применены методы подавления неустойчивости, предлагаемые на основе результатов диссертационного исследования. Эти методы показали свою эффективность и позволили продемонстрировать возможность устойчивой транспортировки килоамперного релятивистского электронного пучка в ускорительном комплексе ЛИУ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что в диссертационной работе автор продемонстрировал количественное соответствие результатов, полученных в модельных расчетах и «холодных» экспериментах по измерению электродинамических свойств ускорительного модуля на специально созданном стенде. Кроме того, полученные результаты хорошо **согласуются** с данными экспериментов с электронным пучком на действующем комплексе ЛИУ. Эффективность разработанного программного комплекса и методов подавления поперечной неустойчивости также **подтверждена** сопоставлением большого массива численных и экспериментальных результатов.

Личный вклад соискателя состоит в его непосредственном участии в постановке задачи, в разработке модели для расчета электродинамических характеристик ускорительных модулей в различных конфигурациях, в разработке программного комплекса для моделирования динамики возбуждения и развития поперечной неустойчивости сильноточного электронного пучка в ЛИУ, в проведении численных расчетов и экспериментов, в анализе полученных результатов, а также в подготовке публикаций и представлении результатов работы диссертации на научных конференциях.

В ходе защиты диссертации д.ф.-м.н., академик РАН Диканский Н.С. задал вопрос о технических особенностях созданного экспериментального стенда для проведения «холодных» измерений электродинамических характеристик ускорительного модуля ЛИУ; затем д.ф.-м.н., академик РАН Диканский Н.С. уточнил каков именно спектр возбуждаемых мод, а также привел описание примеров подобных измерений из своего научного опыта. Далее в процессе

защиты диссертации д.ф.-м.н., с.н.с. Кубарев В.В. задал вопрос о том, каким образом осуществляется стабилизация пучка на зарубежных ускорительных комплексах; д.ф.-м.н., академик РАН Бондарь А.Е. попросил прокомментировать результаты, представленные на слайде 25, и сделал замечание к представленному графику; д.ф.-м.н., с.н.с. Давыденко В.И. попросил уточнить возможность реализации активных методов подавления поперечной неустойчивости; д.ф.-м.н., профессор Котельников И.А. попросил уточнить информацию о размере области, занимаемой полем моды, представленной на слайде 10. Заключительный вопрос задал д.ф.-м.н., академик РАН Пархомчук В.В., попросив уточнить влияние материала индукторов на поглощение энергии собственных колебаний.

Соискатель Сандалов Е.С. согласился с замечаниями и ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, приводя собственную аргументацию.

Диссертация Сандалова Е.С. «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с изменениями и дополнениями от 20 марта 2021 года № 426.

На заседании 10.10.2023 диссертационный совет принял решение:

за решение научной задачи обеспечения устойчивости интенсивного релятивистского электронного пучка, генерируемого в линейном индукционном ускорителе с дискретной фокусирующей системой, имеющей существенное значение для развития физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники присудить **Сандалову Е.С.** ученую степень **кандидата физико-математических наук.**

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0.

Председатель диссертационного
совета 24.1.162.02,
д.ф.-м.н.

 / Багрянский Петр Андреевич /

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.1.162.02,
д.ф.-м.н., профессор РАН

 / Лотов Константин Владимирович /

12.10.2023

