

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11
<http://www.mephi.ru>

НИЦ "Курчатовский институт" -
Институт физики высоких
энергий имени А.А. Логунова

Директору ИФВЭ
Академику РАН
С.В. Иванову

№ _____

На № _____ от _____

Уважаемый Сергей Владиславович,

Прошу Вас принять к защите диссертацию доцента кафедры Электрофизических установок Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» Полозова Сергея Марковича «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, в связи с отсутствием в НИЯУ МИФИ диссертационного совета по физико-математическим наукам по данной специальности.

Диссертация представляется к защите впервые.

Приложения:

диссертация С.М. Полозова, 1 том;

автореферат диссертации С.М. Полозова, 1 экз.

Ректор НИЯУ МИФИ

д.ф.-м.н., профессор




М.Н. Стриханов

УТВЕРЖДАЮ

Ректор НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессор

М.Н. Стриханов

2019 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Диссертация Полозова Сергея Марковича на тему «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника выполнена на кафедре Электрофизических установок Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) в период 2004 – 2019 гг.

В период работы над диссертацией соискатель Полозов Сергей Маркович работал в НИЯУ МИФИ на кафедре Электрофизических установок в должности доцента.

С.М. Полозов окончил Московский инженерно-физический институт по специальности Физика пучков заряженных частиц и электрофизические установки в 2000г. и аспирантуру Московского инженерно-физического института (государственного университета) в 2003 г. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме

«Ускорение и фокусировка интенсивных ионных пучков в высокочастотных структурах с использованием ондуляторов» защищена в 2003г. по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, в 2007г. С.М. Полозову присвоено ученое звание доцента по кафедре Электрофизических установок.

По результатам рассмотрения диссертации «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» на совместном заседании кафедры Электрофизических установок и Радиационно-Ускорительного центра 22 мая 2019г. принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы. Диссертация Полозова Сергея Марковича «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» является законченной научной работой и посвящена актуальной проблеме современной ускорительной физики – разработке и апробации новых методов исследования нелинейной динамики пучков заряженных частиц в ускорителях. Соискателем разработан ряд аналитических и численных методов, алгоритмов и программ для численного моделирования динамики пучков электронов и ионов в линейных ускорителях, а также выполнена их апробация в ходе разработки, создания, запуска и модернизации ускорителей научного и прикладного назначения. Проведенные запуски в эксплуатацию ряда новых ускорителей электронов и ионов показали совпадение результатов исследования динамики с экспериментальными данными с точностью лучше 1 % для максимальной вероятной энергии пучка и не хуже 2-3 % для спектра пучка и коэффициента захвата в режим ускорения.

Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично, в частности автором:

1. Разработаны методы усреднения по быстрым осцилляциям обобщены на случай отсутствия в системе синхронной с пучком

пространственной гармонике высокочастотного поля. Уравнение движения записано в виде уравнения Гамильтона, содержащего эффективную потенциальную функцию, анализ которой позволяет определить полный шестимерный аксептанс канала ускорителя, найти частоты продольных и поперечных колебаний и исследовать их связь, определить аксептанс канала. Обобщен подход к учету поправки на быстрые осцилляции скорости частиц в выражениях для частот колебаний частиц и аксептанса канала.

2. Для ряда линейных резонансных ускорителей ионов проведено аналитическое исследование динамики пучка, выполнено сравнение эффективности ускорения и поперечной фокусировки в них для различных диапазонов частот ускоряющего поля и скоростей частиц.

3. Разработаны алгоритмы для численного моделирования самосогласованной динамики пучков заряженных частиц с учетом квазистатической (кулоновской) и высокочастотной (излучение пучка и нагрузка током) компонент собственного поля пучка. С использованием разработанных алгоритмов написано и протестировано несколько версий программы BEAMDULAC для численного моделирования динамики пучка в ускорителях различных типов, каналах транспортировки и нелинейных средах, в частности:

- ускорителях с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой;
- ускорителях с трубками дрейфа;
- ускорителях с аксиально-симметричной высокочастотной фокусировкой;
- линейных ондулятронных ускорителях, в том числе предназначенных для ускорения ленточных пучков;
- ускорителях ионов, построенных по модульному принципу на основе отдельных коротких независимо фазируемых резонаторов;
- каналах транспортировки ионных пучков, в том числе – каналах для ленточных пучков;
- линейных резонансных ускорителей электронов на бегущей и стоячей волне;

- кристаллах с учетом излучения электронов при каналировании;
- плазменных каналах;
- программа для систематического учета ошибок изготовления и юстировки электродов.

4. Разработанные программы BEAMDULAC-RFQ и BEAMDULAC-DTL использованы в ходе разработки объединенной командой ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ и НИЯУ МИФИ нового форинжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-NICA Объединенного института ядерных исследований. В частности, с помощью этих программ разрабатывались стартовые версии канала нового ускорителя и выполнялась контрольная проверка динамики пучка. Ускоритель успешно запущен в 2015 г. и к настоящему времени отработал шесть сеансов в составе основного инжектора в «Нуклотрон».

5. Разработаны алгоритм и версия программы BEAMDULAC-2B, которая позволяет моделировать динамику пучка, состоящего из ионов нескольких типов, в частности – положительно и отрицательно заряженных. С помощью данной программы показано, что в ускорителях с ПОКФ предельный поток «квазинейтрального» пучка может в 4-5 раз превышать ток пучка, состоящего из ионов одной зарядности. Для линейных ондуляторных ускорителей, в которых действующая на частицы сила пропорциональна квадрату знака заряда, предельный поток определяется нелинейными эффектами объемного заряда и теоретически может достигать 10 А.

6. Для транспортировки ленточных пучков ионов низкой энергии, в том числе кластерных, предложено использовать щелевой канал на основе электростатического ондулятора. Такой канал разработан и создан в ходе работ по новым источникам для ионных имплантеров, выполненных совместно ИТЭФ, ИСЭ РАН, НИЯУ МИФИ и BNL.

7. Программа BEAMDULAC-BL, предназначенная для исследования

самосогласованной динамики пучка электронов в ускорителях на бегущей и стоячей волне с учетом нагрузки током и квазистатической компоненты собственного поля пучка, протестирована в ходе работ по модернизации ускорителя ЛУЭ-200, являющегося драйвером электронного пучка «Источника Резонансных Нейтронов» (ИРЕН) ОИЯИ. Было показано, что двукратное отличие полученной энергии от проектного значения и широкий спектр пучка вызваны влиянием нагрузки током, которое не было учтено в ходе разработки. Предложены методы улучшения параметров ЛУЭ-200, в частности – замена группирователя на более эффективный. Эта же версия программы использовалась при моделировании динамики в проектируемом совместно с CERN и ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН инжекторе на энергию до 14 ГэВ для проекта CERN Future Circular Collider в его лептонной версии FCC-ee.

8. Выполнено моделирование динамики пучка и разработаны ускоряющие структуры для серии ускоряющих структур для промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность пучка до 20 кВт, созданную совместно с НПП «Корад». Совпадение результатов исследования динамики, проведенного с помощью программы BEAMDULAC-BL при проектировании ускорителя, с экспериментальными данными с точностью лучше 1 % для максимальной вероятной энергии пучка и на хуже 2-3 % для спектра пучка и коэффициента захвата. В базовой модели ускорителя на энергию 10 МэВ с использованием адиабатического группирователя удалось добиться высокого (до 70 %) коэффициента токопрохождения, рекордного диапазона перестройки энергии (3-11 МэВ) и спектра пучка лучше ± 3 % FWHM в диапазоне энергий 4-10 МэВ. В ускорителе использована бипериодическая ускоряющая структура с повышенным до 14 % коэффициентом связи по магнитному полю, что позволило уменьшить влияние нагрузки током на динамику пучка и время переходных процессов при заполнении структуры мощностью и пучком. На одном из ускорителей при энергии пучка 10 МэВ и средней мощности 12 кВт

удалось получить полный КПД около 20 %, что является в настоящее время лучшим результатом в мире. В ускорителе на энергию 2 МэВ удалось получить среднюю мощность до 2 кВт при питании от магнетрона. Всего к настоящему времени запущено шесть ускорителей новой серии.

9. С использованием классического электродинамического подхода разработаны алгоритмы и программа для численного моделирования динамики электронов при каналировании в кристаллах. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показывает, что точность определения максимума спектра излучения – не хуже 5 % при энергиях до 100 МэВ и 10 % при энергиях до нескольких ГэВ.

10. С помощью разработанных алгоритмов и программ для численного моделирования динамики электронов в плазменных каналах показано, что при использовании внешней инжекции и премодуляции пучка можно получить спектр пучка не хуже 3 % при энергии до 100 МэВ, а коэффициент прохождения повысить до 40-50 %. Для пре-модуляции пучка помимо канала со спадающей плотностью плазмы («рампинга») предложено использовать несколько коротких участков с плазмой, что дает лучшие результаты по сравнению с «рампингом». Исследованы и объяснены механизмы потерь частиц при ускорении в лазерно-плазменном канале, вызванных особенностями формирования и движения потенциальной ямы и нарушением синхронизма частиц с плазменной волной. Обнаружен в ходе численного моделирования и обоснован эффект сильной поперечной дефокусировки частиц, потерянных из режима ускорения.

Результаты диссертации внедрены:

1. В Объединенном институте ядерных исследований в ходе работ по созданию нового фор-инжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-NICA.

2. В НПП «Корад» при создании серии новых промышленных

ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ с повышенным высокочастотным и полным КПД, возможностью перестройки энергии пучка в широком диапазоне при сохранении узкого спектра пучка. Разработанные секции использовались в шести запущенных ускорителях: двух на энергию 10 МэВ и среднюю мощность до 20 кВт, изготовленных для компании EB-Tech, Тэджон, Республика Корея (радиационная стерилизация медицинских изделий и пищевой продукции, радиационная обработка полимерных материалов, тестирование дозиметрического оборудования); одном на 10 МэВ и 15 кВт для компании «АКЦЕНТР», г.Родники, Ивановская область (радиационная стерилизация медицинских изделий), одном на 10 МэВ и 3 кВт на новой площадке НПП «Корад», Санкт-Петербург, (питание от магнетрона, радиационная стерилизация, рентгеновская дефектоскопия); одном на энергию 8 МэВ для Навоийского горно-металлургического комбината, Узбекистан (активационный анализ); одном на энергию 2 МэВ и среднюю мощность до 2 кВт для НПП «Корад» (эксперименты по радиационной стерилизации пищевой продукции, подготовка к созданию мобильной версии установки).

3. В НИЦ «Курчатовский институт» - Институт теоретической и экспериментальной физики в ходе работ по созданию ионных источников, используемых в имплантерах для полупроводниковой промышленности, внедрен канал транспортировки на основе плоского электростатического ондулятора.

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием экспериментальных данных, полученных в ходе запусков в эксплуатацию нового инжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ, серии промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность в пучке до 20 кВт, систем транспортировки пучков тяжелых и кластерных ионов результатам аналитического и численного исследования динамики пучков.

Научная новизна заключается в следующем:

1. С использованием методов усреднения уравнения движения по быстрым осцилляциям аналитически исследована динамика в нескольких типах линейных резонансных ускорителей ионов, включая как классические ускорители с синхронной с пучком пространственной гармоникой высокочастотного поля, так и системы, в которых ускорение происходит на волне биеения, а также укорители, построенные по модульному принципу. Предложен метод нахождения поправки, возникающей за счет быстрых осцилляций, к выражениям для частот продольных и поперечных колебаний и аксептансов канала, полученных в гладком приближении.

2. Разработано несколько программ для численного моделирования динамики пучка в линейных ускорителях ионов и электронов, входящих в пакет BEAMDULAC. Впервые в мире реализован алгоритм для трехмерного моделирования самосогласованой динамики пучка электронов в ускорителях на бегущей и стоячей волне с учетом кулоновского поля и нагрузки током.

3. Программа BEAMDULAC использована для моделирования динамики пучка при разработке ускорителя с ПОКФ – нового инжектора ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ, запуск ускорителя показал соответствие экспериментальных данных расчетным.

4. Подробно изучены особенности динамики квазинейтрального пучка, включающего ионы равной массы, но противоположной зарядности. С помощью численного моделирования исследованы особенности группировки таких пучков и оценены предельные потоки ионов для нескольких типов ускорителей.

5. Разработан канал транспортировки ленточного ионного пучка при низких энергиях на основе плоского электростатического ондулятора. Канал использован в ходе создания новых источников для ионных имплантеров и показал свою высокую эффективность при относительных скоростях ионов $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$ скорости света.

6. Совместно с НПП «Корад» разработаны и запущены в серию новые ускоряющие структуры для линейных ускорителей электронов прикладного назначения на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность до 20 кВт с повышенным КПД и улучшенным спектром пучка.

7. С использованием классического электродинамического подхода разработана версия программы BEAMDULAC-CR для исследования динамики электронов в кристаллах с возможностью моделирования излучения при каналировании. Сравнение результатов численного моделирования с данными нескольких экспериментов показало, что точность определения максимума спектра излучения – не хуже 5 % при энергиях электронов до 100 МэВ и 10 % при энергиях до нескольких ГэВ.

8. Предложены методы оптимизации лазерно-плазменных каналов, используемых для ускорения электронов, позволяющие повысить коэффициент захвата частиц в режим ускорения при внешней инжекции пучка и уменьшить его энергетический спектр.

Практическая ценность подтверждается внедрением результатов аналитического и численного исследования динамики пучков в ходе работ по реконструкции системы инжекции ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ; созданием совместно с НПП «Корад» серии промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность в пучке до 20 кВт; созданием систем формирования и транспортировки пучков тяжелых и кластерных ионов для систем имплантации в полупроводники.

Апробация результатов диссертации.

Основные результаты диссертации были представлены на международных и российских конференциях:

Particle Accelerator Conference 2007, 2009;

European Particle Accelerator Conference 2004, 2008;

Linear Accelerator Conference 2004, 2012, 2014;
International Particle Accelerator Conference 2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2017, 2018;
ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams 2010, 2016, 2018;
Russian Particle Accelerators Conference 2012, 2014, 2016, 2018;
XV-XX Международных семинарах по ускорителям заряженных частиц в 2005, 2007, 2009, 2011, 2013;
Beam Dynamics and Optimization 2000, 2002, 2010, 2014;
Advanced Accelerators and Radiation Physics Workshop 2010, 2012, 2014, 2017, 2018;
«Научной сессии МИФИ» в 2004 – 2014 годах;
Отраслевой научной конференции «Атомтех 2013»;
«Черенковских чтениях» 2014;
III Международной конференции, посвященной 85-летию со дня рождения В.И. Зубова «Устойчивость и процессы управления» 2015;
Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц, посвященном памяти В.П. Саранцева 2015, 2017;
Международном военно-техническом форуме «Армия 2016»
и других.

Результаты докладывались и обсуждались на семинарах в НИЯУ МИФИ, Институте теоретической и экспериментальной физики, Объединенном институте ядерных исследований, Московском радиотехническом институте, Национальной лаборатории Фраскати (LNL INFN, Италия), Gesellschaft für Schwerionenforschung и Helmholtz Zentrum Mainz (Германия).

Специальность, которой соответствует диссертация

Тема диссертации соответствует специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Согласно Паспорту

рассматриваемые в диссертации вопросы относятся к пунктам:

1. Расчетно-теоретические аспекты создания ускорителей, накопителей и систем транспортировки ускоренных пучков. Анализ проблем расходимости пучка.

3. Исследования и расчеты динамики пучков заряженных частиц в ускоряющих и фокусирующих каналах. Сложение пучков. Разработка расчетных программ.

6. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования излучений, создаваемых пучками заряженных частиц.

8. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий пучков заряженных частиц с электромагнитными полями, друг с другом, с молекулами остаточного газа и конструкционными материалами и мишенями.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 144 научных публикациях, из которых 97 публикаций в рецензируемых изданиях, в том числе 80 статей индексируются в международных базах данных Web of Science и/или Scopus, 17 опубликовано в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (раздел 01.04 – физика). Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

1 С.М. Полозов BEAMDULAC-multibunch-tw для численного моделирования динамики пучка в линейном ускорителе электронов на бегущей волне с учетом нагрузки током. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018661944, дата регистрации 24.09.2018г.

- 2 **S.M. Polozov**, V.I. Rashchikov. Longitudinal motion stability of electrons inside the plasma channel of LPWA. *Cybernetics and Physics*, 2018, V. 7, No. 4, pp. 228–232 (**Scopus**).
- 3 W.A. Barth, T. Kulevoy, **S.M. Polozov** et al. Beam Dynamics Study and Electrodynamics Simulations for the CW RFQ. *Proc. of IPAC'17*, 2017, pp. 1333-1336 (**Scopus**).
- 4 Barth W.A., Kulevoy T.V., Polozov S.M., Yaramyshev S. Beam Dynamics Simulations and Code Comparison for a New CW RFQ Design. *Proc. of HB'16*, 2016, pp. 188–190 (**Scopus**).
- 5 T.V. Bondarenko, **S.M. Polozov**. First Results of Beam Dynamics Simulation in electron injector linac for FCC-ee. *Proc. of RuPAC'16*, 2016, pp. 264-266 (**Scopus**).
- 6 M.V. Lalayan, **S.M. Polozov**, M.I. Demsky et al. Commissioning and First Tests of the New Standing Wave 10 Mev Electron Accelerator. *Proc. of RuPAC'16*, 2016, pp. 173-175 (**Scopus**).
- 7 W.A. Barth, T. Kulevoy, **S.M. Polozov**, S. Yaramyshev. Beam Dynamics Study for the New CW RFQ. *Proc. of RuPAC'16*, 2016, pp. 267-269 (**Scopus**).
- 8 К.А. Алиев, А.В. Самошин, **С.М. Полозов** и др. О возможности использования сверхпроводящих резонаторов для реконструкции протонного инжектора комплекса «Нуклотрон». *Письма в Журнал «Физика Элементарных частиц и атомного ядра»*, 2016, Т. 13, № 7 (205), с. 1418–1424 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 9 Т.В. Бондаренко, **С.М. Полозов**, А.П. Сумбаев. Расчёт влияния нагрузки током ускоряющей структуры в ускорителе ЛУЭ-200. *Письма в Журнал «Физика Элементарный частиц и атомного ядра»*, 2016, №7, Т. 13, № 7 (205), с. 1432-1437 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 10 Г.Н. Кропачев, Т.В. Кулевой, **С.М. Полозов** и др. Проектирование и создание нового инжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для модернизации ЛУ-20. *Письма в Журнал «Физика Элементарный частиц и атомного ядра»*, 2016, №7, Т. 13, № 7 (205),

- с. 1425-1431 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 11 **С.М. Полозов**, А.В. Самошин, А.В. Бутенко и др. О возможности использования сверхпроводящих резонаторов для реконструкции протонного инжектора комплекса «Нуклотрон». Письма в Журнал «Физика Элементарный частиц и атомного ядра» , 2016, Т. 13, № 7 (205), с. 1418-1424 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 12 **S.M. Polozov**, V.I. Rashchikov. Capturing coefficient increase and energy spread decrease in LPWA. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 747, 012075 (**Scopus**).
- 13 Ю.А. Башмаков, Т.В. Бондаренко, **С.М. Полозов**. Генерация излучения в рентгеновском диапазоне при плоскостном каналировании релятивистских электронов в кристаллах. Журнал технической физики, 2016, 86, вып. 7, с. 118-123 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 14 Ю.А. Башмаков, Т.В. Бондаренко, **С.М. Полозов**. Источник излучения для медицинской рентгенографии, основанный на использовании излучения электронов при каналировании в кристаллах. Краткие сообщения по физике ФИАН, 2016, т. 43, вып. 2 , с. 13-17 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 15 А.Н. Диденко, Т.В. Кулевой, **С.М. Полозов** и др. Моделирование динамики протонного пучка в ускорителе-драйвере на энергию 600-1000 МэВ и исследование электродинамических характеристик ускоряющих резонаторов. Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 5, с. 278-287 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 16 А.Н. Диденко, Т.В. Кулевой, **С.М. Полозов** и др. Разработка концепции ускорителя-драйвера протонного пучка на энергию 600–1000 МэВ при средней мощности пучка более 1 МВт. Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 4, с. 217-224 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 17 I.A. Ashanin, **S.M. Polozov**, A.V. Samoshin. Beam Dynamics Simulation in SC Linac for the Proton Radiotherapy. Proc. of IPAC'14, 2014, pp. 3289-3291 (**Scopus**).
- 18 **S.M. Polozov**, A.V. Samoshin. Beam dynamics simulation in high power driver

- linac using BEAMDULAC-SCL code. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2014, No 3 (91), pp. 143-146 (**WoS, Scopus**).
- 19 Yu.A. Bashmakov, **S.M. Polozov**. Electron beam dynamics and channeling radiation simulation in crystal. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2014, No 3 (91), pp. 134-137 (**WoS, Scopus**).
- 20 T.V. Kulevoy, **S.M. Polozov**, G.V. Trubnikov et al. Reconstruction of light and polarized ion beam injection system of JINR Nuclotron-NICA accelerator complex. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2013, No 6 (88), pp. 8-12 (**WoS, Scopus**).
- 21 T.V. Bondarenko, **S.M. Polozov**, E.S. Masunov. BEAMDULAC-BL code for 3D simulation of electron beam dynamics taking into account beam loading and coulomb field. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2013, No 6 (88), pp. 114-118 (**WoS, Scopus**).
- 22 **S.M. Polozov**. 2D Beam Dynamics Simulation in Linear Mode LPWA Channel with Pre-modulation Stage. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2013, No 6 (88), pp. 29-34 (**WoS, Scopus**).
- 23 **S.M. Polozov**. A possible scheme of electron beam bunching in laser plasma accelerators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, 729, pp. 517–521 (**WoS, Scopus**).
- 24 Т.В. Бондаренко, А.Н. Диденко, **С.М. Полозов**. Ускоряющая система генератора электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. Ядерная физика и инжиниринг, 2013, том 4, № 8, с. 719–728 (**BAK**).
- 25 T.V. Bondarenko, **S.M. Polozov**. Photoinjector and accelerating system for sub-mm high power pulse source. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2012, 3 (79), pp. 53-57 (**WoS, Scopus**).
- 26 **S.M. Polozov**, A.V.Voronkov, E.S. Masunov, V.I.Raschikov. Stationary and transient beam dynamics simulation results comparison for traveling wave electron linac with beam loading. Problems of Atomic Science and Technology.

- Series Nuclear Physics Investigations, 2012, No 4 (80), p. 96-99 (**WoS, Scopus**).
- 27 **S.M. Polozov**. Ion beam space charge neutralization using for beam intensity increase in linacs. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, No 3 (79), pp. 131-136, 2012 (**WoS, Scopus**).
- 28 А.В. Воронков, Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**, В.И. Ращиков. Расчет динамики пучка в ускорителях, работающих на бегущей волне, с учетом эффекта нагрузки током. Атомная Энергия, 2010, Т. 109, вып. 2, с. 84-89 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 29 Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**, А.В. Самошин. Динамика тяжелоионного пучка в сверхпроводящем линейном ускорителе на малые энергии. Ядерная физика и инжиниринг, 2010, т. 1, № 5, с. 357-364 (**ВАК**).
- 30 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. The beam space charge neutralization in UNDULAC-E. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2010, No 2 (53), pp. 118-121 (**WoS, Scopus**).
- 31 Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**. Динамика двухкомпонентного ионного пучка в линейном ондуляторном ускорителе. Журнал технической физики, 2009, 79, 8, с. 93-98 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 32 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. High intensity ion beams in rf undulator linac. Physical Review ST AB, 2008, 11, 074201 (**WoS, Scopus**).
- 33 A. Hershcovitch, T.V. Kulevoy, **S.M. Polozov** et al. Status of ITEP decaborane ion source program. Review of Scientific Instruments, 2008, 79, 02C501 (**WoS, Scopus**).
- 34 E.S. Masunov, T.V. Kulevoy, **S.M. Polozov** et al. Development of ribbon ion beam source and transport system for industrial applications. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2008, No 5 (50), pp. 64-67 (**WoS, Scopus**).
- 35 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. Using BEAMDULAC code multi-beam dynamics investigation in ion linac. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2008, No 5 (50), pp.136-139 (**WoS, Scopus**).

- 36 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. Space-Charge Neutralization in Ion Undulator Linear Accelerator. Proc. of PAC'2007, 2007, pp. 1565-1567 (**Scopus**).
- 37 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. BEAMDULAC code for numerical simulation of 3D beam dynamics in a high-intensity undulator linac. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, 558, pp. 184–187 (**WoS, Scopus**).
- 38 T.V. Kulevoy, **S.M. Polozov**, E.S. Masunov et al. Transport line for beam generated by ITEP Bernas ion source. Review of Scientific Instruments, 2006, 77, 03C112 (**WoS, Scopus**).
- 39 T.V. Kulevoy, E.S. Masunov, **S.M. Polozov**, V.I. Pershin. Low energy ribbon ion beam source and transport system. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2006, No 2 (46), pp. 123-125 (**WoS, Scopus**).
- 40 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. The new version of BEAMDULAC code for high intensity ion beam dynamics. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, 2006, No 3 (47), pp. 119-121 (**WoS, Scopus**).
- 41 Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**. Ускорение и фокусировка интенсивных ионных пучков в высокочастотных структурах с использованием ондуляторов. Журнал технической физики, 2005, 75, 7, с. 112-118 (**WoS, Scopus, ВАК**).
- 42 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. Peculiarities of ribbon ion beam dynamics in the undulator linear accelerator. Problems of atomic science and technology, 2004, #1, issue 42, p. 134-136 (**WoS, Scopus**).
- 43 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. Numerical simulation of 3D ion ribbon beam dynamics in RF undulator linac. Problems of atomic science and technology, 2004, #2, issue 43, p. 141-143 (**WoS, Scopus**).

Личный вклад автора в публикациях

- [1], [21], [26],[28] Разработал алгоритмы и программу BEAMDULAC-BL для трехмерного численного моделирования динамики пучков электронов в линейных ускорителях на бегущей и стоячей волне с учетом нагрузки током и квазистатической составляющей собственного поля пучка самосогласованным образом;
- [2], [12], [22],
[23] Предложил методы улучшения параметров пучка электронов, ускоряемых в лазерно-плазменном канале, основанные на использовании рампинга с синусоидальным изменением плотности плазмы и нескольких коротких участков с плазмой для группировки пучка; разработал программу для численного моделирования динамики пучка в канале лазерно-плазменного ускорителя; обнаружил эффект быстрой поперечной дефокусировки частиц, вылетевших из режима синхронизма с плазменной волной;
- [3], [4], [7] С использованием программы BEAMDULAC-RFQ провел численное моделирование динамики пучка в ускорителе с ПОКФ, предназначенном для работы в непрерывном режиме;
- [5] Разработал общую схему инжектора электронов для CERN FCC-ee, включая два форинжектора, исследовал динамику пучка в ускорителе;
- [6] Разработал общую концепцию нового промышленного ЛУЭ на энергию 10 МэВ и среднюю мощность до 20 кВт с возможностью регулировки энергии в широком диапазоне; провел моделирование и оптимизацию динамики пучка в данном ускорителе;

- [8], [11] Предложил концепцию нового сверхпроводящего линейного ускорителя-инжектора для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-NICA ОИЯИ, необходимого также для отработки в нашей стране в щадящих условиях технологий высокочастотной сверхпроводимости; разработал общую концепцию данного сверхпроводящего линейного ускорителя;
- [9] Провел численное моделирование динамики пучка в ускорителе ЛУЭ-200 – драйвере электронного пучка для нейтронного генератора «ИРЕН» ОИЯИ и предложил методы улучшения параметров пучка;
- [10], [20] Провел контрольное численное моделирование динамики пучка в новом инжекторе с ПОКФ для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-NICA ОИЯИ;
- [13], [14], [19] На основе классического электродинамического подхода разработал программу BEAMDULAC-CR для исследования динамики электронов в кристаллах и процесса излучения при каналировании;
- [15], [16], [18], [29] Разработал версию программы BEAMDULAC-SCL для моделирования динамики ионных пучков в ускорителях, построенных по модульному принципу; разработал общую концепцию ускорителя-драйвера;
- [17] Разработал общую концепцию сверхпроводящего линейного ускорителя для протонно-лучевой терапии; предложил методы регулировки энергии пучка в таком ускорителе;
- [24], [25] Разработал алгоритмы и программу BEAMDULAC-BL_Photogun для трехмерного численного моделирования динамики пучков электронов в линейных ускорителях с фотопушками;

- [27] Разработал новую версию программы BEAMDULAC-2B для моделирования динамики пучков ионов с различным отношением заряда к массе и выполнил моделирование динамики ленточного пучка ионов с противоположной зарядностью в ускорителях с ПОКФ и ускорителях Альвареца;
- [30], [31], [36] Разработал программу BEAMDULAC-2B и провел численное моделирование динамики ленточного пучка ионов с противоположной зарядностью в линейных ондуляторных ускорителях;
- [32], [37], [41], [42], [43] Разработал программу BEAMDULAC-ULA и провел численное моделирование динамики ленточного пучка ионов дейтерия в линейном ондуляторном ускорителе с высокочастотным ондулятором;
- [33], [34], [38], [39] Предложил идею использования в ионных имплантерах плоского электростатического ондулятора со щелевым каналом для транспортировки пучков тяжелых и кластерных ионов при низких энергиях, провел численное моделирование динамики пучка и моделирование распределения полей в структуре;
- [35] Разработал новую версию программы BEAMDULAC-2B для моделирования динамики пучков ионов с различным отношением заряда к массе для ускорителей с ПОКФ и ускорителей с трубками дрейфа;
- [40] Разработал новые версии программы BEAMDULAC для моделирования динамики пучков ионов в ускорителях с ПОКФ, ускорителях Альвареца, а также программу для

оценки влияния конструкционных погрешностей на динамику пучка;

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методики аналитического исследования динамики ионных пучков с использованием метода усреднения уравнения движения по быстрым осцилляциям, разработанные для линейных резонансных ускорителей ионов, включая классические ускорители с синхронной с пучком пространственной гармоникой высокочастотного поля и системы, в которых ускорение происходит на волне биеения.

2. Программы и алгоритмы для численного моделирования динамики пучка в линейных ускорителях ионов и электронов, входящие в пакет BEAMDULAC, включая реализованные впервые в мире алгоритм и программу для трехмерного моделирования динамики пучка электронов в ускорителях на бегущей и стоячей волне с учетом кулоновского поля и нагрузки током методом крупных частиц самосогласованным образом.

3. Результаты моделирования динамики ионного пучка, полученные с помощью программ BEAMDULAC-RFQ и BEAMDULAC-DTL при разработке и создании ускорителя с ПОКФ – нового инжектора ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ.

4. Результаты исследования динамики квазинейтрального пучка, включающего ионы равной массы, но противоположной зарядности, в том числе результаты исследования особенностей группировки таких пучков и оценки их предельных токов.

5. Канал транспортировки ленточного ионного пучка при низких относительных скоростях частиц $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$ скорости света на основе плоского электростатического ондулятора, использованный при создании новых источников для ионных имплантеров.

6. Результаты моделирования динамики пучка и разработки ускоряющих секций в целом для серии новых линейных ускорителей электронов

прикладного назначения на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность пучка до 20 кВт с повышенным КПД и улучшенным спектром пучка.

7. Версия программы BEAMDULAC-CR, разработанная с использованием классического электродинамического подхода и предназначенная для исследования динамики электронов в кристаллах с возможностью моделирования излучения при каналировании.

8. Методы и схемы оптимизации лазерно-плазменных каналов, используемых для ускорения электронов, позволяющие за счет предварительной модуляции пучка повысить коэффициент захвата частиц в режим ускорения при внешней инжекции и уменьшить спектр пучка.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1) В основных результатах работы необходимо указать численные значения, подтверждающие совпадение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Принято следующее решение

Диссертация Полозова Сергея Марковича «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» **рекомендуется** к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника как законченная научно-квалификационная работа, в результате которой разработаны и внедрены новые аналитические и численные методы исследования нелинейной динамики пучков ионов и электронов, что внесло значительный вклад в развитие ускорителей заряженных частиц научного и прикладного назначения в России.

Диссертация Полозова Сергея Марковича «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» заслушана и одобрена на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ.

Заключение принято на совместном заседании кафедры Электрофизических установок и Радиационно-ускорительного центра НИЯУ

МИФИ от 22 мая 2019г. Присутствовало на заседании 29 чел. Результаты голосования: «за» – 29, «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол НТС кафедры Электрофизических установок № 10 от 22 мая 2019г.

И.О. заведующего кафедрой
Электрофизических установок,
к.т.н., доцент



В.В. Дмитриева

Научный руководитель Радиационно-
ускорительного центра,
д.т.н., профессор



Б.Ю. Богданович

Ученый секретарь кафедры
Электрофизических установок,
д.т.н., профессор



А.Е. Шиканов

И.о. директора Института лазерных и
плазменных технологий
д.ф.-м.н., профессор



А.П. Кузнецов

Председатель Совета по аттестации и
подготовке научно-педагогических
кадров НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н., профессор



Н.А. Кудряшов

ВЫПИСКА
из протокола № 10
заседания научно-технического совета
кафедры Электрофизических установок
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
от 22 мая 2019 года

Присутствовали: д.т.н., профессор Б.Ю. Богданович, д.т.н., профессор В.И. Каминский, д.ф.-м.н., профессор А.Р. Каримов, д.ф.-м.н., профессор А.В. Нестерович, д.т.н., профессор А.Е. Шиканов, д.т.н., профессор Э.Я. Школьников, к.т.н., профессор А.Г. Пономаренко, к.ф.-м.н., доцент В.К. Баев, к.ф.-м.н. В.А.Воронцов, к.т.н., доцент М.С. Дмитриев, к.т.н., доцент В.В. Дмитриева, к.ф.-м.н., доцент В.С. Дюбков, к.т.н., доцент М.В. Лалаян, к.т.н, доцент А.Е. Новожилов, к.т.н., доцент А.В. Прокопенко, к.т.н. Ю.М. Путкин, к.т.н., с.н.с. В.И. Ращиков, к.ф.-м.н. А.В. Самошин, к.т.н., доцент В.Л. Шатохин, Г.А. Буянов, А.В. Зиятдинова, А.А. Махоро, С.В. Мациевский, В.Ю. Механикова, Ю.Ю. Лозеев, Т.А. Лозеева, А.С. Панишев, Е.Р. Хабибуллина, О.А. Яковлев.

Повестка дня: обсуждение диссертации Полозова С.М. на тему «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Выступили: С.М. Полозов представил содержание и основные результаты диссертации.

В обсуждении приняли участие Б.Ю. Богданович, А.В. Нестерович, В.И. Каминский, А.Е. Шиканов, А.Г. Пономаренко, В.А. Воронцов, В.И. Ращиков, А.Р. Каримов, А.В. Самошин, В.К. Баев.

Постановили: Научно-технический совет кафедры Электрофизических установок НИЯУ МИФИ рекомендует диссертацию С.М. Полозова «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» к защите на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Присутствовало на заседании 29 чел. Результаты голосования: «за» – 29, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

И.О. заведующего кафедрой
Электрофизических установок,
к.т.н., доцент

В.В. Дмитриева

Ученый секретарь кафедры
Электрофизических установок,
д.т.н., профессор

А.Е. Шиканов