

На правах рукописи

Полозов Сергей Маркович

**Нелинейная динамика пучков ионов и электронов
в линейных ускорителях**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Москва

2019

Работа выполнена на кафедре Электрофизических установок федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор Овсянников Дмитрий Александрович, заведующий кафедрой теории систем управления электрофизической аппаратурой, факультет прикладной математики – процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета;

доктор техн. наук Павлов Юрий Сергеевич, заведующий Лабораторией радиационных технологий, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН;

доктор физ.-мат. наук Парамонов Валентин Витальевич, ведущий научный сотрудник Отдела ускорительного комплекса, Институт ядерных исследований РАН.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Московский радиотехнический институт Российской академии наук»

Защита диссертации состоится “ ” _____ 2019 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте http://ihep.ru/files/polozov_thesis.pdf
НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ.

Автореферат разослан « » _____ 2019г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время ускорители заряженных частиц, кроме традиционной области применения в качестве инструмента для исследований по физике высоких энергий и физике частиц, получают все большее распространение в качестве источников излучения для различных прикладных задач. Для ряда научных и прикладных задач требуются не только пучки с высокой импульсной и/или средней интенсивностью, но и пучки с высокой яркостью. Во многом качество пучка, доступного для эксперимента, определяется параметрами линейного ускорителя-инжектора или драйвера. Традиционной задачей для линейных ускорителей электронов и ионов является инжекция пучка в ионные и электронные коллайдеры и источники синхротронного излучения, также интенсивно развиваются ускорители-драйверы для источников нейтронов на основе реакции скалывания и фабрик тяжелых ионов, начаты работы над ускорителями-драйверами протонных пучков для подкритических электроядерных установок. Проводятся работы по созданию интенсивных линейных ускорителей протонов прикладного назначения для борнейтронзахватной терапии, производства медицинских радиоизотопов, а также многофункциональных ускорителей, на которых возможно было бы проведение экспериментов и промышленное производство с использованием пучков протонов, дейтронов и потоков нейтронов. Основной сложностью для таких ускорителей является работа в непрерывном режиме или режиме с малой скважностью.

Долгое время качеству пучка в линейных электронных ускорителях-инжекторах для коллайдеров и источников синхротронного излучения не уделялось должного внимания. Это было связано, по всей видимости, с тем, что такие комплексы обычно включали в себя линейный ускоритель на энергию несколько сотен МэВ и быстроциклирующий синхротрон, а качество пучка в основном накопителе определялось, в основном, свойствами его оптической структуры. Качество пучка в линейном ускорителе

влияло только на эффективность инъекции. В настоящее время ситуация меняется, так как растут требования к интенсивности инжектируемого пучка и все большее внимание должно уделяться вопросам его формирования, контроля за энергетическим спектром, фазовой (геометрической) протяженностью сгустка и поперечным эмиттансом. Для коллайдеров из-за проблем, связанных с необходимостью эффективной поперечной фокусировки в бустере, энергия инъекции повышается до нескольких ГэВ, для источников синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах начинают использоваться линейные ускорители на полную энергию.

Важную роль играет качество пучка и в линейных резонансных ускорителях электронов прикладного назначения, предназначенных для различных технологических процессов, происходящих под действием бета- и гамма-облучения. Для таких ускорителей эффективность определяется, в основном, высокочастотным и полным КПД, спектром пучка, стабильностью работы установки.

Таким образом, в настоящее время приходится говорить не только о пучках высокой интенсивности, но и пучках высокой яркости в линейных ускорителях. В общем случае критерием оценки интенсивности пучка и необходимости учета влияния объемного заряда следует считать фазовую плотность пучка в шестимерном фазовом пространстве. Минимальная плотность частиц в сгустке, при которой необходимо учитывать влияние объемного заряда при исследовании динамики пучка, может быть оценена как 10^7 зарядов/сгусток. Эта величина характерна для практически всех современных ускорителей электронов и ионов как научного, так и прикладного назначения, а для некоторых типов она может достигать $10^{10} - 10^{11}$ зарядов/сгусток.

Отдельную сложность представляет исследование динамики в случае использования пучков со специальной формой поперечного сечения пучка: ленточного или трубчатого, в которых когда может быть снижено влияние квазистатической (кулоновской) компоненты собственного поля.

С развитием новых типов ускоряющих резонаторов (прежде всего –

сверхпроводящих), на основе которых ускорители строятся по модульному принципу, появилась необходимость отказа от непрерывного соблюдения условия синхронизма пучка с ускоряющим полем, то есть наличия в пучке равновесной частицы, скорость которой в любой момент совпадает с фазовой скоростью волны ускоряющего поля. Стандартные подходы к исследованию динамики пучка в этом случае уже неприменимы и необходима разработка новых аналитических и численных методов. Также динамику заряженных частиц необходимо исследовать в ряде нестандартных систем, к которым можно отнести каналы лазерно-плазменных ускорителей, кристаллы, волноводы, заполненные диэлектриком и т.д.

При исследовании динамики пучка в ускорителях необходимо учитывать влияние эффектов объемного заряда. Собственное поле пучка можно разделить на две составляющие: электростатическое поле (кулоновская составляющая) и поле излучения, включая нагрузку током. В результате динамика частиц в ускорителе будет зависеть не только от величины внешнего ускоряющего поля, но и от собственного поля пучка. Для более точного исследования динамики пучка следует решать уравнения движения частиц совместно с уравнениями Максвелла (или другими уравнениями, в частных случаях описывающими собственные поля пучка, например, уравнением возбуждения или уравнением Пуассона), т.е. изучать динамику пучка самосогласованным образом.

Таким образом, развитие новых аналитических и численных методов, а также программ для численного моделирования динамики пучков в линейных ускорителях электронов и ионов по-прежнему остается актуальной задачей современной физики ускорителей.

Целью работы являлась разработка аналитических и численных методов, алгоритмов и программ для численного моделирования динамики пучков электронов и ионов в линейных ускорителях, а также их апробация в ходе разработки, создания, запуска и модернизации ускорителей научного и прикладного назначения.

Научная новизна работы состоит 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 биения, а также ускорители, 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 самосогласованной 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 работы подтверждается успешным внедрением результатов аналитического и численного исследования динамики пучков в ходе работ по реконструкции системы инжекции ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ; созданию совместно с НПП «Корад» серии промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность в пучке до 20 кВт; созданию систем формирования и транспортировки пучков тяжелых и кластерных ионов для систем имплантации в полупроводники.

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 биения.

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.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на международных и российских конференциях: Particle Accelerator Conference 2003, 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 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013; Beam Dynamics and Optimization 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 «Устойчивость и процессы управления» 2015; Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева 2015, 2017; Международном военно-техническом форуме «Армия 2016» и других. Также 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 Schwerionen Forschung и Helmholtz Zentrum Mainz (Германия).

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.

Личный вклад автора

Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Представленные в диссертации аналитические и численные методы, алгоритмы и программы для исследования динамики пучков заряженных частиц в линейных ускорителях, разработаны лично автором либо в соавторстве. Результаты аналитического и численного исследования динамики пучков в различных ускорителях и каналах получены автором лично либо под его научным руководством. Вклад соавторов в результаты, полученные совместно, оговаривается в тексте диссертации для каждого случая.

Публикации

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 144 научных публикациях, из которых 76 публикаций индексируются в базе данных Scopus, 43 публикации – в базе данных Web of Science, 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).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 579 наименований, и приложения, в которое включены акты о внедрении результатов диссертации в ОИЯИ, ГНЦ РФ ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» и НПП «Корад». Объем диссертации составляет 363 страницы, включая 29 таблиц и 111 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается текущее состояние работ по исследованию динамики пучков, рассмотрены актуальные проблемы, стоящие перед физикой ускорителей и подходы к их решению.

В первых двух главах, которые носят методический характер, описаны аналитические и численные методы, разработанные в ходе работы над диссертацией и использованные при исследовании динамики интенсивных пучков электронов и ионов в различных линейных ускорителях. **В первой главе** рассматриваются аналитические методы исследования динамики пучка в линейных ускорителях, в частности возможности и проблемы использования методов усреднения уравнения движения по быстрым осцилляциям. При исследовании динамики пучков заряженных частиц в линейных ускорителях, в отличие от циклических, редко прибегают к использованию аналитических методов, и большинство разработчиков полностью перешли к использованию численного моделирования. Такой подход применим при проектировании давно известных и хорошо освоенных типов ускорителей, однако он сложен и иногда приводит к неожиданным и некорректным результатам. Особенно это очевидно для ускорителей, построенных по модульному принципу, в которых из-за скольжения сгустка по фазе нарушается принцип синхронизма и традиционная форма описания процесса автофазировки работает только в системе отсчета, связанной со сгустком. Также использование только численных методов невозможно в высокочастотных периодических структурах, в которых отсутствует синхронная с пучком пространственная гармоника высокочастотного поля, например, ускорителях на волне биения. Использование матричного и гамильтонова подходов при разработке линейных ускорителей на начальном этапе исследования позволяет быстро и корректно определить общую структуру ускорителя, найти условия устойчивости, предельный ток и другие параметры установки и, таким образом, является мощным инструментом разработчика.

Методы усреднения и связанные с ним методы анализа уравнения движения используются в физике с XVII-XVIII веков, когда их в неявном виде для решения частных задач применяли И. Ньютон для нахождения периода колебаний маятника или М.В. Остроградский для решения уравнения с кубической характеристикой. Однако свое развитие они получили

уже в XX веке благодаря работам Б. Ван-дер Поля [*1], Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси [*2], строгая теория метода была разработана Н.Н. Боголюбовым [*3]. Для анализа динамики электронов этот метод был впервые использован А.В. Гапоновым и М.А. Миллером [*4], параметром малости в данных работах являлось отношение амплитуд быстро осциллирующей компоненты координаты частицы к медленно меняющейся. Позднее Э.С. Масуновым было показано [*5], что при усреднении достаточно выполнения условия малости отношения быстро осциллирующей к медленно меняющейся компоненте скорости частиц. В этом случае в уравнение движения

$$\frac{d^2 \mathbf{R}}{d\tau^2} = \mathbf{e}(\mathbf{R}, \tau) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{R}} U_{eff}(\mathbf{R}), \quad (1)$$

входит в явном виде так называемая эффективная потенциальная функция (ЭПФ), U_{eff} , зависящая только от поперечных координат и медленно меняющейся фазы частицы в поле волны, но не зависящая в явном виде от времени. ЭПФ, фактически, описывает трехмерную динамику пучка в поле волны. В формуле (1) \mathbf{R} – медленно меняющаяся компонента обобщенной координаты $\mathbf{R} = (\rho, \eta, \xi)$, $\xi = 2\pi z / \lambda$, $\rho = 2\pi x / \lambda$ и $\eta = 2\pi y / \lambda$, $\tau = \omega t$, ω и λ – частота и длина волны ВЧ поля (здесь и далее полужирным шрифтом обозначены векторные величины). Уравнение движения в гладком приближении можно записать в форме уравнения Гамильтона:

$$d\mathbf{R} / d\tau = \partial H / \partial \mathbf{P}; \quad d\mathbf{P} / d\tau = -\partial H / \partial \mathbf{R}, \quad (2)$$

где $\mathbf{P} = \mathbf{R}'$ – обобщенный импульс, канонически сопряженный обобщенной координате \mathbf{R} , а H – Гамильтониан системы «пучок – волна»:

$$H(\mathbf{R}, \mathbf{P}) = \mathbf{P}^2 / 2 + U_{eff}(\mathbf{R}). \quad (3)$$

Такая форма представления уравнения движения позволяет в явном виде получить условия устойчивости продольного и поперечного движения пучка, выражения для частот продольных и поперечных колебаний частиц и акцептанса канала. Было показано, что уравнение движения в гладком приближении может быть получено для любой ускоряющей структуры

независимо от характера взаимодействия пучка с волной. Метод был использован при аналитическом исследовании динамики пучка в классических системах, в которых присутствует синхронная с пучком пространственная гармоника ВЧ поля (ускорители с пространственно-однородной квадрупольной, ПОКФ, и аксиально-симметричной высокочастотной, АВФ, фокусировкой), для случая ускорения комбинационной волной (линейные ондуляторные ускорители, ЛОУ, [*5]), в модульных системах, состоящих из последовательности одинаковых резонаторов. Полученные для этих трех случаев уравнения движения в форме уравнения Гамильтона несколько отличаются по форме, но позволяют судить об устойчивости динамики пучка и корректности выбора параметров канала ускорителя.

Далее с использованием метода усреднения выполнено сравнение эффективности ускорения и поперечной фокусировки в ускорителях с ПОКФ и АВФ. Показано, что для меньших скоростей или при меньших радиусах апертуры система с АВФ имеет более высокий темп ускорения по сравнению с ПОКФ. Поперечная фокусировка в АВФ более эффективна только при более высоких скоростях ионов.

Далее рассмотрены результаты аналитического исследования динамики в линейных ондуляторных ускорителях с электростатическим (ЛОУ-Е) и высокочастотным (ЛОУ-ВЧ) ондулятором для случая аксиально-симметричных и ленточных систем [1-3, 7-8, 12]. В ЛОУ обе несинхронные пространственные гармоники влияют и на продольное ускорение пучка, и на его поперечную фокусировку. Для ЛОУ-ВЧ это может приводить к потере частиц из режима ускорения комбинационной волной в случае, когда отношение амплитуды первой и основной пространственных гармоник ВЧ поля χ больше или меньше оптимального значения $\chi = E_1/E_0 = 0,3-0,4$. Условие поперечной фокусировки может быть найдено методом разложения U_{eff} в ряд в приосевом приближении, что позволяет вывести выражения для частот поперечных колебаний. В ЛОУ-ВЧ на виде колебаний $\mu = \pi$ условие поперечной фокусировки выполняется при любых значениях χ , на виде колебаний $\mu = 0$ должно быть $E_1 \geq 2E_0$. В ЛОУ-Е ам-

плитуда основной гармоники ВЧ поля и поле электростатического ондулятора должны быть равны. Также необходимо отметить, что для ЛОУ в ЭПФ и уравнение движения для равновесной частицы заряд иона входит квадратично:

$$\frac{d(\beta - \beta_s)}{d\tau} = e_{eff} (\cos m\varphi - \cos m\varphi_{v,s}), \quad (4)$$

где для ЛОУ-ВЧ $m=2$, а эффективная амплитуда поля комбинационной волны $e_{eff} = e^2 E_0 E_1 \lambda^2 / 4 p \pi^2 W_0^2 \beta_s$ ($p=1$ для $\mu=\pi$ и $p=2$ для $\mu=0$), для ЛОУ-Е $m=1$ и $e_{eff} = e^2 E_0 E_0' \lambda^2 / 8 \pi^2 W_0^2 \beta_s$. Из-за этой особенности при совместном ускорении положительно и отрицательно заряженных ионов они будут находиться в одной сгустке. Это свойство является принципиальным отличием ЛОУ от других типов резонансных ускорителей, в которых сгустки ионов разного знака после группировки будут разнесены на половину периода ВЧ поля. Такая особенность может быть использована для компенсации влияния объемного заряда пучка на его динамику и повышения интенсивности, подробно этот вопрос рассмотрен в главе 3.

Анализ уравнения движения в гамильтоновой форме позволяет также определить связь между продольным и поперечным движением. Шестимерный фазовый объем определяется выражениями для ЭПФ, анализ которых позволяет также найти максимальные размеры апертуры канала и максимально допустимый разброс поперечных и продольных скоростей частиц в сгустке. Чтобы определить предельную величину Гамильтониана, достаточно найти разность между значениями ЭПФ в точке абсолютного минимума и в точке, где величина поперечной и разброс продольной скоростей частиц равны нулю. Если известны предельные величины скорости, размер апертуры, зависимость фазовой длины сепаратрисы от синхронной фазы, то можно определить значения продольного и поперечного акцептанса канала ускорителя в гладком приближении. В простейшем случае приведенный поперечный акцептанс равен $A_r = \pi a_r \beta_r$, где a_r – апертура канала, β_r – максимальная поперечная скорость. Это выражение дает

завышенную оценку акцептанса и традиционно в высокочастотных ускорителях принято делать запас в 3 – 10 раз. Точно этот запас может быть найден, если сравнить динамику пучка в гладком приближении и в полном поле. В работе [*6] для систем с ПОКФ была введена поправка \tilde{r}/r на быстрые осцилляции для частоты поперечных колебаний $\hat{\omega}_r = \Omega_r \omega / (1 + \tilde{r}/r)^2$ и акцептанса канала $A_r = \Omega_r 2\pi^2 a_y^2 / \lambda (1 + \tilde{r}/r)^2$, где Ω_r – частота колебаний в гладком приближении, \tilde{r} и r – быстро осциллирующая и медленно меняющиеся компоненты поперечной координаты. Однако в [*6] не приведен способ вывода этой поправки, который был разработан в ходе работы над диссертацией.

Также в первой главе приведена методика анализа динамики в ускорителях ионов, построенных по модульному принципу. Методика была разработана в 2001-2005 годах в рамках участия МИФИ в нереализованном проекте ускорителя радиоактивных изотопов RIA (AEBF, ANL, США). Она была впоследствии использована при разработке ускорителя-драйвера протонного пучка на энергию 1 ГэВ, протонного медицинского ускорителя на энергию до 240 МэВ, проекте развития системы инъекции ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ [15, 26-29, 33]. Методика включает матричный анализ динамики пучка, использование уравнения движения в гладком приближении и численное моделирование в полном поле.

В качестве примера рассмотрена концепция ускорителя-драйвера протонного пучка на энергию 1 ГэВ, которая была разработана в рамках проекта НИЯУ МИФИ, НИЦ «Курчатовский институт» и ИТЭФ. Компонентная схема ускорителя включает ионный источник на электронциклотронном резонансе, секцию с ПОКФ, несколько нормально проводящих Н-резонаторов и модульную сверхпроводящую часть, в которой энергия пучка меняется от 20 до 1000 МэВ. Было определено, что необходимо использовать пять групп различных сверхпроводящих резонаторов с геометрической скоростью $\beta_G = 0,31; 0,36; 0,48; 0,65$ и $0,875$. С помощью

матриц для отдельных элементов структуры были выведены матрицы для ее периода, рассчитаны параметры Флоке μ_z и μ_r и получены условия устойчивости поперечного и продольного движения. Точное значение параметра Флоке для поперечного движения может быть определено, если заданы максимальная огибающая X_m и поперечный эмиттанс \mathcal{E}_r пучка. Также показано, что минимальная величина магнитного поля соленоидов B , обеспечивающая поперечную фокусировку пучка протонов, составляет $B=1,4-2,6$ Тл в зависимости от скорости.

Во второй главе рассматриваются численные методы и алгоритмы, разработанные для семейства программ BEAMDULAC, предназначенного для численного моделирования динамики пучка в линейных резонансных ускорителях. Основной проблемой, с которой сталкиваются разработчики сильноточных высокочастотных ускорителей, является точный учет влияния собственного поля пучка на его выходные характеристики. Собственное поле пучка можно разделить на две составляющие: электростатическое поле (кулоновская составляющая) и поле излучения, включая эффект нагрузки током. Динамика частиц в ускорителе будет зависеть не только от величины внешнего ускоряющего поля, но и собственного поля пучка. Программа BEAMDULAC [3-4, 8-9, 12-13, 16, 18, 23, 37, 42] имеет модульную архитектуру и включает следующие основные блоки: блок констант и переменных; блок подключения внешних файлов для определения параметров ускорителя и пучка, разбиения структуры на периоды, импорта полей, заданных на сетке, экспорта промежуточных и итоговых результатов моделирования; блок генерации начальных распределений частиц; блок интегрирования уравнений движения; блок учета собственного кулоновского поля; блок учета нагрузки током; блок обработки текущих (пошаговых) результатов моделирования; блок финальной обработки результатов; подпрограммы для определения внешних полей; блок расчета зависимостей параметров структуры по длине канала; блок контроля. Интегрирование самосогласованных уравнений движения производится по времени методом Рунге – Кутты 4-го порядка. В разработке различных

модулей и версий программы участвовали Э.С. Масунов, С.М. Полозов, Н.Е. Виноградов, А.В. Самошин, В.С. Дюбков.

Программа позволяет задавать внешние поля тремя способами: аналитически; в виде суммы пространственных гармоник; на сетке в виде распределения, полученного в результате численного моделирования (с помощью пакетов CST Studio, HFSS и др.) или экспериментального измерения полей в резонаторе. Моделирование в «реальном поле», т.е. в поле, заданном в узлах сетки, позволяет учесть все особенности и экстремумы распределения поля. Главной проблемой в данном случае является решение задачи интерполяции поля на сетке. В BEAMDULAC, как и во многих других программах, интегрирование уравнений движения проводится по времени в движущейся системе координат, связанной с синхронной или равновесной частицей, а поле на сетке определено на пространственной сетке в покоящейся системе координат. Традиционные методы интерполяции полей, такие как Фурье-интерполирование и интерполирование тригонометрическими функциями или сплайнами, в данном случае оказываются малоэффективными. Они были опробованы при разработке программы BEAMDULAC и показали недостаточную точность и большое время счета. В итоге для интерполяции на двумерной сетке был выбран метод «взвешивания по площадям» («area weighted interpolation», AWM), для трехмерной – «взвешивание по объемам» («volume weighted interpolation», VWM) [4]. В этом случае погрешность моделирования составляет не более 0,1-0,5 % для двумерного случая и 1-2 % для трехмерного. Кроме того, существенно важным является выбор методов продольной и поперечной экстраполяции поля «за сеткой». В BEAMDULAC для продольной экстраполяции был использован метод Фурье-экстраполяции, для поперечной – комбинированный метод разложения Фурье-Бесселя. Это позволило существенно снизить погрешность экстраполяции и для двумерного случая ошибка не превышает 1 – 3 %, для трехмерного 1-5 %.

Для расчета квазистатической компоненты собственного поля в пакете BEAMDULAC используется метод «облако в ячейке» (cloud-in-cell, CIC)

второго порядка точности, а уравнение Пуассона решается методом быстрых преобразований Фурье (БПФ). В большинстве программ кулоновское поле многокомпонентного пучка, когда в пучке присутствуют частицы с различным отношением заряда к массе Z/A , рассчитывается отдельно для каждого типа ионов, а затем проводится суперпозиция электрических полей. Такой метод не является достаточно точным, так как корректно учитывает только взаимодействие между частицами для одного типа ионов. Для программы BEAMDULAC-2B был разработан новый алгоритм: методом «облако в ячейке» находится распределение зарядов на сетке для каждого типа ионов; для каждого из полученных распределений зарядов выполняется разложение Фурье; коэффициенты Фурье для разных типов ионов суммируются и находится Фурье-образ суммарного заряда пучка в узлах сетки; решается на сетке алгебраическое уравнение, связывающее коэффициенты Фурье для заряда и потенциала; выполняется синтез Фурье для потенциала собственного поля и находятся компоненты суммарного собственного поля многокомпонентного пучка [13-17]. Предложенный алгоритм позволяет работать не с набором ионов, имеющих различные Z/A , а с Фурье-образами зарядов и коэффициентами Фурье вместо дифференциалов с различными весовыми коэффициентами в правой части уравнения движения, что повышает его точность и снижает время расчета.

Для учета высокочастотной компоненты собственного поля (нагрузки током) используется метод решения уравнения возбуждения, предложенный Э.С. Масуновым [*7] для периодических волноводных и резонаторных структур, и новые алгоритмы и численные методы, описанные в работах [16, 18, 23].

Для учета влияния конструкционных погрешностей на динамику пучка в программе BEAMDULAC-Erg использован статистический метод.

В третьей главе приведены результаты аналитического и численного исследования динамики пучка в различных ускорителях ионов. Рассмотрены результаты моделирования для различных типов линейных ондуляторных ускорителей [1-3, 7-8, 12-14]. Показано, что оптимальный диапа-

зон энергий пучков протонов и ионов дейтерия, в котором ЛОУ наиболее эффективны, находится в пределах от 100 кэВ до 1,5 – 2,0 МэВ для ЛОУ-Е и ЛОУ с ВЧ ондулятором, работающем на виде колебаний $\mu=0$, и до 2,0 – 2,5 МэВ для ЛОУ-ВЧ на виде колебаний $\mu=\pi$. В ЛОУ-ВЧ с полем на виде колебаний $\mu=0$ темп ускорения составляет 400–500 кэВ/м, на виде колебаний $\mu=\pi$ 500–750 кэВ/м и в ЛОУ-Е 500–600 кэВ/м при напряженности поля на оси 150-200 кВ/см. Для сравнения, при такой-же напряженности поля средний темп в структуре с АВФ примерно равен темпу ускорения в ЛОУ-ВЧ с полем на виде $\mu=0$ и ЛОУ-Е, а в ускорителе с ПОКФ он ниже – 300–350 кэВ/м. Максимальный ток ленточного пучка, ускоряемого в ЛОУ-ВЧ на виде колебаний $\mu=\pi$, составил $I_{\max}=0,2-0,25$ А (предельная плотность тока не превышает $J_{\max}=0,12$ А/см²), для ЛОУ-Е – до 1,4 А ($J_{\max}\leq 0,18 - 0,2$ А/см², [7, 12]).

Далее рассматриваются результаты численного моделирования динамики пучка в новом фор-инжекторе с ПОКФ, разработанном и запущенном в ОИЯИ в рамках реконструкции системы инжекции ускорительного комплекса «Нуклотрон»-НИСА [24, 34] (см. рис. 1). Новый инжектор обеспечил ускорение ионов с отношением заряда к массе $0,3 \leq Z/A \leq 1,0$ с током до 40 мА до кинетической энергии 0,156 МэВ/нуклон при коэффициенте токопрохождения не хуже 80 % и последующую инжекцию в ускоритель с трубками дрейфа ЛУ-20. Фазовая протяженность сгустка на выходе секции с ПОКФ не должна превышать $\Delta\phi \leq 90^\circ$, а разброс по продольному импульсу $|\Delta p/p| \leq \pm 4$ % (≤ 3 % для протонов). Ускоритель был разработан и запущен в конце 2015г. командой сотрудников ОИЯИ, ИТЭФ и НИЯУ МИФИ. Динамика пучка в новой секции с ПОКФ исследовалась и оптимизировалась с помощью нескольких пакетов для численного моделирования. Основным являлся пакет DYNAMION [*8] (моделирование проведено Г.Н. Кропачевым), другие программы, в том числе BEAMDULAC-RFQ, использовались для сравнения и контроля результатов. Моделирование позволило также провести дополнительное тестирование программы BEAMDULAC. На рисунке 2 показаны фазовые портре-

ты и поперечное сечение пучка на выходе канала с ПОКФ, полученные с помощью программ DYNAMION (а) и BEAMDULAC-RFQ (б). Из рисунка видно, что пучок хорошо согласован с каналом ПОКФ, а результаты, полученные с помощью BEAMDULAC-RFQ и DYNAMION, совпадают не только качественно, но и количественно. Небольшие различия вызваны разными методами синтеза начальных распределений и тем, что поле в DYNAMION представляется большим числом пространственных гармоник, что позволяет точнее учесть влияние формы головки электродов на динамику. Также в BEAMDULAC и DYNAMION используются разные обозначения для фазы: $\varphi(z, t) = \int h_n dz - \omega t$ и $\varphi(z, t) = \omega t - \int h_n dz$.

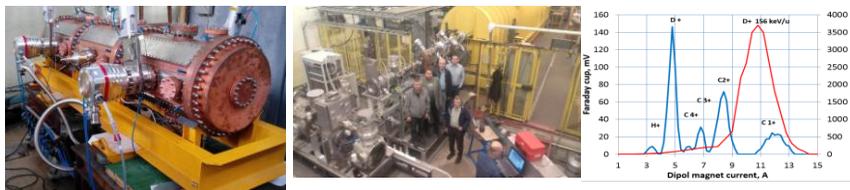


Рисунок 1 – Резонатор нового фор-инжектора с ПОКФ на испытательном стенде в ИТЭФ перед отправкой в ОИИЯ (слева), ускоритель смонтирован на входе ЛУ-20 и готов к запуску (в центре), спектры ускоренных пучков (справа)

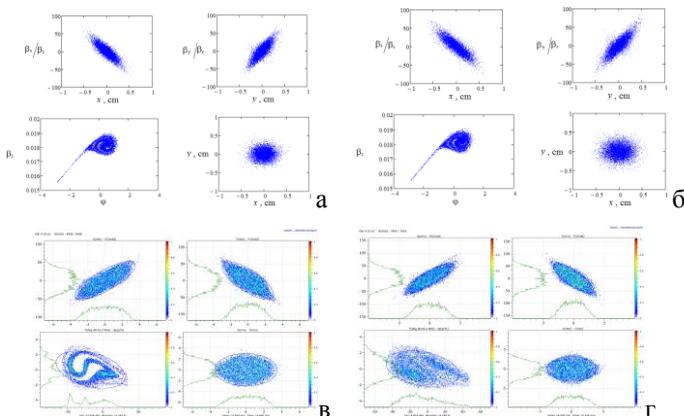


Рисунок 2 – Фазовые портреты и поперечное сечение пучка на выходе ускоряющей секции с ПОКФ: $Z/A=0,3$, $I_0=10$ (а) и 20 мА (б) (расчет в BEAMDULAC-RFQ); $Z/A=0,3$, $I_0=10$ (в) и 20 мА (г) (расчет в DYNAMION)

Для последующего согласования ПОКФ и основной секции инжектора

ЛУ-20 с помощью программы BEAMDULAC-DTL было проведено моделирование динамики пучков протонов, дейтронов и ионов углерода C^{4+} в ускоряющей структуре ускорителя с трубками дрейфа. Были определены оптимальные параметры ускоряющей структуры (градиенты квадрупольей, ускоряющее напряжение) и условия согласования. Показано, что для ионов с $|\Delta p/p_s| \leq 4\%$ ($\leq 3\%$ для протонов) и $\Delta\varphi \leq 90^\circ$ в ЛУ-20 можно обеспечить коэффициент токопрохождения сгруппированного пучка около 98 %.

В настоящее время одной из задач, стоящих перед ускорительной техникой, является переход к работе ускорителей протонов и ионов в непрерывном режиме или режиме с малой скважностью. Это необходимо для ускорителей-драйверов источников нейтронов на основе реакций скалывания, подкритических электроядерных установок и фабрик радиоактивных изотопов, а также для компактных исследовательских и прикладных ускорителей. Особенно сложной задачей является создание нормально проводящей части таких ускорителей, обычно состоящей из секции с ПОКФ и нескольких резонаторов *H*-типа. Это обусловлено не только более высокими требованиями к надежности системы, например – к предотвращению возникновения пробоев, но и проблемами с термостабилизацией ускоряющих резонаторов. Всего в мире к настоящему времени создано около десяти ускорителей с ПОКФ, работающих в непрерывном режиме (обзор см. в [*9]). Одним из путей, который может облегчить электрический и тепловой режим работы резонатора, является снижение разности потенциалов между электродами секции с ПОКФ. Это приведет к увеличению длины резонатора, но позволит уменьшить общую потребляемую мощность, которая пропорциональна длине секции и квадрату напряженности электрического поля, и, что самое важное, снизить удельное тепловыделение на единицу длины резонатора. Возможность реализации данного подхода рассмотрена в работах [36, 39-40], выполненных совместно с коллегами из GSI и ИТЭФ. Особенностью структур с низкой напряженностью поля являются сложности, возникающие при группировке пучка. Это связано с относительно малой величиной продольного аксептанса в

таком ускорителе. При этом группирователь должен обеспечивать полный захват пучка и обеспечить эффективную поперечную фокусировку, так как потери частиц при работе в непрерывном режиме приводят к дополнительной тепловой и радиационной нагрузке на структуру. Исследование динамики пучка проводилось с помощью программ DYNAMION (моделирование выполнено С.Г. Ярамышевым) и BEAMDULAC-RFQ. Кроме непосредственно разработки новой структуры с ПОКФ, моделирование позволило дополнительно сравнить программы. Были определены параметры нового непрерывного ускорителя с ПОКФ: энергия пучка протонов на выходе 2,0 МэВ, ток пучка 10 мА, разность потенциалов между электродами 1,3 – 1,5 от предельного значения, определенного по критерию Килпатрика, рабочая частота 162 МГц. При среднем радиусе канала 0,53 см и радиусе скругления электродов 0,412 м максимально допустимое рабочее напряжение между электродами составит 90 кВ. В результате численного моделирования канал ПОКФ был оптимизирован, определены начальные параметры пучка, обеспечивающие поперечное согласование. Продольные и поперечные фазовые портреты пучка показаны на рисунке 3 (а). Для сравнения двух программ также был использован метод, основанный на анализе яркости пучка [40]. Он состоит в следующем: для некоторых сечений пучка рассчитывается RMS эмиттанс для заданного

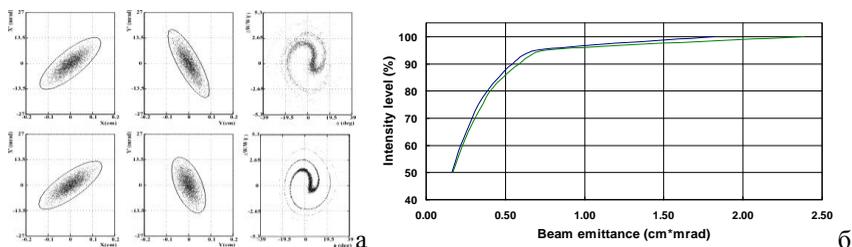


Рисунок 3 – Поперечные и продольный фазовые портреты пучка (а) на выходе ускорителя с ПОКФ, полученные в результате численного моделирования с использованием программ BEAMDULAC-RFQ (вверху) и DYNAMION; результаты анализа яркости пучка (б), позволяющие показать отличное совпадение результатов моделирования DYNAMION (синяя кривая) и BEAMDULAC (зеленая кривая) ансамбля крупных частиц, а затем из ансамбля последовательно исклю-

чаются частицы, выходящие за пределы фазового эллипса, описывающего 99, 98, 97, ... , 50 % частиц (см. рис. 3 б).

Решать задачу исследования динамики и оптимизации параметров ускорителя в системах, построенных по модульному принципу, предлагается с использованием комбинации аналитических (матричных методов и усреднения по быстрым осцилляциям) и численных методов. Для численного моделирования динамики в таких структурах в МИФИ была разработана версия программы BEAMDULAC-SCL. В главе 1 в качестве примера приведены результаты, полученные при проектировании ускорителя-драйвера протонного пучка [26]. Также данная методика использовалась при проектировании ускорителя для протонно-лучевой терапии (ПЛТ) [27]. Для этого ускорителя была разработана методика перестройки энергии пучка с сохранением величины поперечного эмиттанса на выходе ускорителя. Для медицинского пучка должно быть обеспечено постоянство поперечного эмиттанса пучка и его размера на выходе ускорителя во всем диапазоне энергий протонов от 70 до 240 МэВ. Ускоритель для ПЛТ будет состоять из четырех групп резонаторов с геометрической скоростью $\beta_g = 0,09, 0,18, 0,31$ и $0,49$. Для изменения энергии пучка предлагается изменять амплитуду поля в резонаторе (вплоть до отключения части резонаторов) и фазу влета частицы в резонатор [27], а также комбинацию этих способов. Первый способ позволяет обеспечить регулировку энергии в очень широком диапазоне, но не гарантирует постоянства эмиттанса пучка, второй позволяет более точно работать с эмиттансом, но диапазон перестройки по энергии будет значительно меньше, так как при фазах влета, близких к $\pi/2$, нарушается устойчивость продольного движения. Оптимальной является комбинация этих двух методов, когда грубая регулировка энергии осуществляется изменением амплитуды поля, а плавная – подстройкой фазы влета для нескольких последних резонаторов.

Ещё одним ускорителем, разработанным по модульному принципу, является новый инжектор для ускорительного комплекса «Нуклотрон» – NICA ОИЯИ, который должен обеспечивать ускорение протонов до энер-

гии 25-30 МэВ [36] и ионов дейтерия до энергии не менее 7,5 МэВ/нуклон. Использование именно СП резонаторов не является критичным для этого ускорителя из-за большой скважности, достаточной для работы инжекционного комплекса, однако позволит отработать технологии производства СП ускоряющих резонаторов, а также ввод СП ускорителя в эксплуатацию. В связи с отсутствием в России технологий высокочастотной сверхпроводимости, в марте 2016г. была создана новая российско-белорусская коллаборация, в которую вошли ОИЯИ, НИЯУ МИФИ, ИЯП БГУ, ФТИ НАНБ, БГУИР и НПЦ НАНБ по материаловедению. В текущей версии ускорителя предполагается использование четвертьволновых коаксиальных резонаторов с частотой 162,5 МГц и $\beta_G = 0,12$, а также полуволновых резонаторов на 325 МГц и $\beta_G = 0,21$.

Влияние объемного заряда является основным фактором, ограничивающим интенсивность пучка в линейных ускорителях ионов на низкие энергии. Можно утверждать, что в настоящее время в структурах с ПОКФ достигнуты токи пучка, близкие к теоретическим предельным значениям. Есть два пути увеличения интенсивности пучка: увеличить его поперечное сечение или использовать нейтрализацию объемного заряда. Первый способ требует увеличения сечения канала ускорителя, что невозможно, т.к. требуемые величины потенциала будут расти пропорционально квадрату апертуры канала, либо необходимо создавать ускорители ленточных и трубчатых пучков. Известны три основных идеи нейтрализации влияния объемного заряда пучка: с использованием электронного облака, плазменных линз, или ионизированного остаточного газа; сложение пучков («funneling»), совместное ускорение положительных и отрицательных ионов [*11]. Для низких и средних энергий предпринимались попытки рассмотрения совместного ускорения двух ионных пучков с разным знаком заряда в линейных ускорителях Альвареса и системах с ПОКФ. В таких системах ускоряющая сила пропорциональна знаку заряда частицы и ионы с противоположным знаком заряда будут группироваться около различных фаз ускоряющей волны. При дальнейшем ускорении сгустки

ионов противоположных знаков (p , H^- или D^+ , D^-) будут пространственно разделены в продольном направлении и компенсации сил кулоновского расталкивания здесь не происходит. Моделирование динамики с использованием стандартных программ типа PARMILA или PARMTEQ и их модификаций в этом случае приводило многих авторов к неожиданным результатам: например получалось, что полный поток в пучке (p , H^-) в ускорителе с ПОКФ будет меньше, чем в случае ускорения ионов одного типа. Это обусловлено тем, что в программах для учета влияния пространственного заряда пучка на динамику используется простейшая модель заряженного эллипсоида, не позволяющая корректно учесть взаимодействие между сгустками, особенно в процессе группировки. При использовании более точных программ для численного моделирования были получены качественно отличные результаты. Так, А.П. Дуркиным с соавторами с использованием программы LIDOS было показано [*12], что коэффициент токопрохождения (K_T) пучка при использовании нейтрализации удастся поднять примерно на 10 %, т.е. свести потери частиц практически к нулю. Однако оценка предельного тока пучка (p , H^-) с нейтрализацией и без в работе [*12] отсутствует. Качественная нестыковка результатов, полученных различными авторами, привела к необходимости проведения моделирования с использованием специально разработанной программы BEAMDULAC-2B. Было показано, что в ускорителе с ПОКФ поток двухкомпонентного пучка ионов (p , H^- ; D^+ , D^- ; O^+ , O^-) может превышать предельный ток для однокомпонентного пучка не в два, а в 4-5 раз [17]. Это происходит из-за особенностей динамики в группирующей части ускорителя, где не полностью промодулированные пучки будут пространственно перекрываться, и поле пространственного заряда будет частично скомпенсировано.

Была исследована возможность совместного ускорения в одном сгустке положительно и отрицательно заряженных ионов в ЛОУ, в которых равновесная скорость пропорциональна квадрату заряда иона (см. формулу (4)) [8, 9, 13]. Показано, что быстрые колебания центра масс для сгуст-

ков положительных и отрицательных ионов происходят в противофазе, но ионы с разными знаками заряда ускоряются в одной сепаратрисе (рис. 4 а). Полный поток нейтрализованного пучка в ЛОУ-ВЧ может быть очень велик (см. рис. 4 б): K_T не уменьшается с увеличением тока для каждого из типов ионов, если интенсивности для ионов D^+ и D^- равны, $|I^{(+) }| = |I^{(-)}|$, т.е. наблюдается полная компенсация пространственного заряда. Однако нелинейные кулоновские эффекты приводят к росту поперечного эмиттansa пучка и потерям частиц в случае, когда ток каждого типа ионов превышает 4 А. Схожие результаты были получены и для ЛОУ-Е.

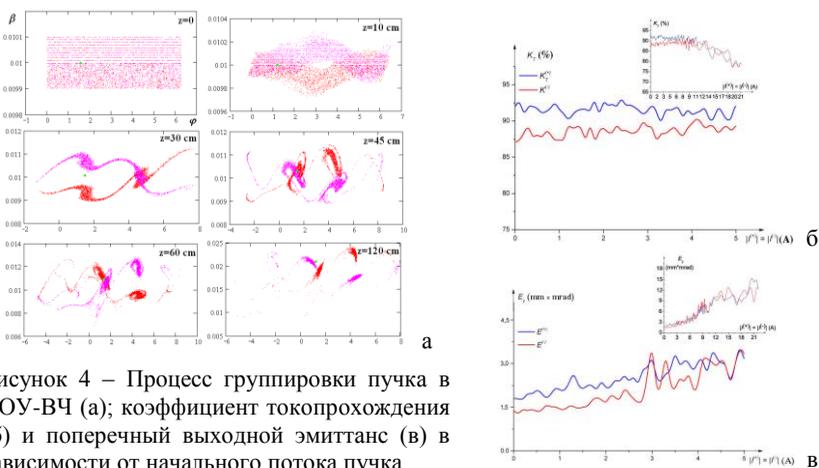


Рисунок 4 – Процесс группировки пучка в ЛОУ-ВЧ (а); коэффициент токопрохождения (б) и поперечный выходной эмиттанс (в) в зависимости от начального потока пучка

Проблема транспортировки пучков тяжелых и кластерных ионов при низких и сверхнизких энергиях ($\beta \approx 10^{-4} - 10^{-3}c$) очевидна, особенно для промышленных установок, таких как ионные имплантеры. Современные полупроводниковые приборы требуют формирования всё более мелких элементов, и, следовательно, меньшей энергии имплантируемых ионов. При этом для сохранения производительности необходимо сохранять высокую плотность тока ионного пучка J при всё более низкой энергии, что является явно противоречащими друг другу задачами, так как $J \sim U^{3/2}$, где U – ускоряющее напряжение. Одним из возможных решений является генерация ионов кластерных молекул различных элементов, например

бора, с последующим формированием и транспортировкой пучка. В 2005-2010 годах коллективом сотрудников ИТЭФ, ИСЭ РАН, BNL и НИЯУ МИФИ была разработана серия источников ионов для имплантеров. В ходе работ были получены ленточные пучки ионов атомарных бора и фосфора с током до 10 мА, а позднее – однозарядных ионов декаборана, октодекаборана и карборана, энергия пучка составляла всего 0,06 – 1,00 кэВ/нуклон. Для транспортировки ленточных пучков ионов в МИФИ было предложено использовать периодическую систему электростатических линз со щелевым каналом – плоский электростатический ондулятор [5, 6, 11]. В ходе моделирования и экспериментально было показано, что предложенная система позволяет транспортировать пучки при скоростях $\sim 10^{-4}c$ без потерь при сохранении высокого качества. Для транспортировки требуется небольшая величина потенциала на электродах 3-20 кВ.

Четвертая глава посвящена обсуждению результатов исследования динамики пучка в ускорителях электронов. В первой части главы рассмотрена динамика в ускорителе ЛУЭ-200 (драйвере пучка для нейтронного генератора «ИРЕН», ОИЯИ) и предложены методы оптимизации ускорителя. ЛУЭ-200 был разработан в начале 1990 годов в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Он был запущен в 2009г. и в стартовой конфигурации с одной регулярной ускоряющей секцией проработал на эксперимент более пяти лет. ЛУЭ-200 состоит из источника электронов на основе диодной электронной пушки, четырехячеечного группирователя, и двух основных ускоряющих секций (вторая запущена в 2017г.) с круглым диафрагмированным волноводом (КДВ) SLAC-типа длиной 3 м (85 ускоряющих ячеек), работающих на бегущей волне и виде колебаний $2\pi/3$. Питание осуществляется от клистрона с использованием компрессора типа SLED с коэффициентом усиления по мощности около 4,0. Изначально предполагалось, что для питания будет использован клистрон SLAC 5045 мощностью до 65 МВт, однако до 2018г. использовался менее мощный клистрон Thales TH 2129 с мощностью после SLED около 80 МВт. Это, согласно расчетам, выполненным в ИЯФ СО РАН, должно было

обеспечивать выходную энергию пучка 60 МэВ при использовании одной регулярной секции. Рабочий импульсный ток в ЛУЭ-200 составляет 1-2 А. Использование менее мощного клистрона в сочетании с недооценкой влияния нагрузки током при проектировании ускорителя привело к тому, что при токе около 1 А максимально вероятная энергия частиц пучка на выходе ЛУЭ-200 составляет около 32 МэВ, а при увеличении тока до 2,2 А – менее 30 МэВ. Это не позволяет с достаточной эффективностью генерировать фотонейтроны и не дает установке «ИРЕН» в целом выйти на рабочие параметры. Для определения возможностей дальнейшего развития ускорителя, снижения потерь и повышения мощности пучка с использованием программы BEAMDULAC-BL было проведено моделирование динамики пучка электронов. Данное исследование также позволило ещё раз протестировать программу и конкретно модуль учета нагрузки током и сравнить результаты моделирования и экспериментальные данные, полученные на действующем ускорителе. Моделирование дало результаты, полностью совпадающие с экспериментальными данными [35]. По результатам исследования были даны следующие рекомендации по дальнейшему развитию ЛУЭ-200: заменить клистрон в системе питания на более мощный (выполнено в 2018г.); подобрать оптимальную фазу влета центра сгустка в основную секцию после модуляции в группирователе (выполнено в 2016г.); заменить группирователь на более эффективный и оптимизированный для работы с токами 1-2 А. Также было предложено в ходе данной работы несколько вариантов такого группирователя.

Начиная с 2014г. на кафедре Электрофизических установок НИЯУ МИФИ для НПП «Корад» разработано несколько новых ускоряющих секций для линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) прикладного назначения на энергию 2-10 МэВ с повышенным КПД и улучшенным спектром пучка. Эти ускорители успешно запущены в мелкосерийное производство. Базовой моделью является ускоритель на энергию до 10 МэВ и среднюю мощность в пучке до 20 кВт. В новом ЛУЭ используется бипериодическая ускоряющая структура (БУС), работающая на стоячей волне и в виде коле-

баний $\pi/2$. Для уменьшения времени тестирования и запуска секции средняя величина электрического поля на оси структуры была снижена до 140-150 кВ/см, а Ω -образная ячейка БУС была оптимизирована для снижения коэффициента перенапряжения по электрическому полю до $\sim 3,5$. Также была запланирована возможность изменения энергии в диапазоне 7,5 – 11,0 МэВ без существенного ухудшения спектра пучка. Количество периодов структуры выбрано равным 28, БУС имеет дополнительные парные окна вне оси структуры для увеличения коэффициента связи по магнитному полю. Группирователь состоит из шести периодов с плавно нарастающими фазовой скоростью волны и амплитудой ВЧ поля. Радиус апертуры для всего канала ускорителя равен 5 мм. Для поперечной фокусировки пучка было использовано соленоидальное магнитное поле с индукцией на оси канала 0,035 Тл.

В результате численного моделирования, проведенного с использованием программы BEAMDULAC-BL, было показано, что разработанная структура удовлетворяет требованиям технического задания. Регулировка энергии пучка в структуре в пределах от 4,0 до 11,5 МэВ возможна путем изменения в широких пределах СВЧ мощности, подаваемой в резонатор. При этом для выходной энергии выше 5 МэВ спектр пучка сохраняется в пределах $\pm(2,5-3,0)$ % FWHM. Коэффициент токопрохождения для всех вариантов составил 60-70 %, потери частиц в регулярных ячейках составляют около 3-5 %, остальные происходят в группирователе при энергиях пучка до 1,5 МэВ, что позволило уменьшить радиационную нагрузку на оборудование [38]. Далее была разработана, сконструирована и изготовлена первая ускоряющая структура, которая была успешно запущена в сентябре 2015 года на площадке заказчика – компании EB-Tech, Тэджон, Республика Корея (см. рис. 5). Секция показала высокие значения ЭДХ (измерения / расчет): собственная добротность секции в сборе 14400 / 16600; эффективное шунтовое сопротивление 80,0 / 82,5 МОм/м; коэффициент связи по магнитному полю 13 / 14 %. Использование большого коэффициента связи позволило резко уменьшить время переходного

процесса при установлении в структуре режима стоячей волны и снизить влияние нагрузки током на динамику. Для сравнения на рисунке 6 показаны осциллограммы для рабочего режима двух ускорителей (розовая кривая – ток пучка на датчике Фарадея, желтая – напряжение на клистроне, зеленая – отраженная волна, голубая – напряжение на электронной пушке), поставленных НПП «Корад» в 2015г. для компании EB-Tech и в 2011г. для компании VINAGAMMA (Хошимин, Вьетнам). Во втором ускорителе используется секция, разработанная в НИИ ЭФА им Д.В. Ефремова [*13]. Видно, что коэффициент использования импульса высокочастотной мощности увеличился с 77 до 85 %, время переходного процесса уменьшилось, а ток пучка внутри импульса более стабилен. Электронный КПД для новой секции составил 60 % при энергии пучка 10 МэВ и токе на выходе ускорителя 320 мА, полный КПД около 17 % при средней мощности в пучке около 10 кВт. Измерение мощности пучка проводилось по стандарту ISO/ASTM 51649:2005(E), потребляемой мощности – прямым методом. Второй ускоритель с новой секцией был запущен для компании «АКЦЕНТР» (г. Родники, Ивановская область) в декабре 2016г. (рис. 5). На нем удалось более тщательно исследовать характеристики пучка и эффективность ускорителя, исследование показало отличное совпадение экспериментальных данных и результатов моделирования (таблица 1).

После разработки и успешного запуска базовой версии линейного ускорителя было разработано несколько менее мощных машин на его основе: на энергию ~10 МэВ с питанием от магнетрона мощностью до 3 МВт для промышленного дефектоскопа; секция с возможностью регулировки энергии в диапазоне 3-7 МэВ для системы интроскопии; секция на энергию 8 МэВ для установки активационного анализа; ЛУЭ с локальной защитой на энергию 2 МэВ и среднюю мощность пучка 2 кВт с питанием от магнетрона. Всего к настоящему времени изготовлено шесть секций: четыре на энергию 10 МэВ (две секции для EB-Tech, одна для «АКЦЕНТР» и одна для новой площадки НПП «Корад»); одна на энергию 8 МэВ для



Рисунок 5 – Запущенные ускорители на площадках компаний EB-Tech и «Акцентр»

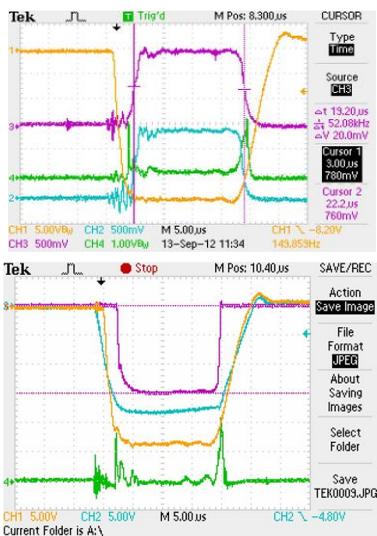


Рисунок 6 – Осциллограммы для рабочего режима ускорителей, поставленных НПП «Корад» для компаний EB-Tech (вверху) и VINAGAMMA

Таблица 1. Сравнение параметров нового ускорителя на 10 МэВ / 20 кВт при различных энергиях пучка на выходе, черным показаны расчетные данные, красным – экспериментальные для ускорителя EB-Tech, синим – для ускорителя «Акцентр». Для второго ускорителя не проводилось измерение тока пушки, дана только оценка коэффициента токопрохождения K_T

Напряженность поля на оси, кВ/см	Макс. вероятная энергия, МэВ	Средняя энергия, МэВ	K_T , %	Ток на выходе, мА	Мощность в пучке, кВт	Потребляемая мощность, кВт	η , %
75,0	3,15	2,36	-	190	600	2400	25,0
75,0	3,19	2,53	30,0	190	610	2310	26,4
85,0	5,39	4,71	-	270	1270	3000	42,3
85,0	5,32	4,43	34,9	270	1200	2900	41,3
100,0	7,05	6,76	48,2	217	1470	2670	55,1
120,0	8,6	7,94	-	300	2580	4400	58,6
120,0	8,61	8,39	56,8	256	2150	3560	60,4
125,0	-	8,68	55,0	320	2770	4600	60,2
125,0	8,60	8,60	55,0	300	2600	4180	62,2
135,0	9,40	8,70	-	300	2820	4850	58,1
135,0	9,38	9,42	63,2	300	3010	4640	64,8
140,0	9,73	9,75	65,2	293	2860	4560	62,7
150,0	10,34	10,32	67,9	306	3160	5080	62,2

Навоийского горно-металлургического комбината (Узбекистан) и одна секция на 2 МэВ для новой площадке НПП «Корад».

В современных инжекторах для лептонных коллайдеров, источников СИ и ЛСЭ предъявляются очень жесткие требования к спектру, поперечному эмиттансу пучка и длительности сгустка. Это привело к интенсивному развитию электронных ВЧ пушек с фотокатодами, в которых необходимо получить высокий заряд в сгустке (сотни пКл – единицы нКл), малый поперечный нормализованный эмиттанс (< 1 мм рад), короткие сгустки ($\sim 0,1-10$ пс) и небольшой разброс по энергии (< 1 %). «Одночастичная теория» фотоэмиссии хорошо развита [*14] и, в основном, основана на трехступенчатой модели. Однако в ходе работ по разработке и созданию фотопушек для European-XFEL [*15] и CERN FCC-ee [39] было выявлено несколько эффектов, которые не могут быть объяснены с помощью традиционной одночастичной теории фотозффекта.

Была разработана версия программы BEAMDULAC-BL-Photogun [19, 39], предназначенная для расчета динамики ярких сгустков в фотопушках. Был скорректирован блок синтеза амплитуды поля: первая ячейка (полужайка) задается отдельно, форма СВЧ поля в ней формируется с помощью собственного полинома. Сгустки, генерируемые фотокатодом, обычно имеют длительность от нескольких десятков фс до нескольких пс. Это не позволяет использовать традиционные для метода «облако в ячейке» (СIC) периодические продольные граничные условия, так как при разумном числе узлов сетки по продольному направлению (16-256) и при фазовой длине сгустка, равной нескольким градусам, весь сгусток будет попадать в одну ячейку пространственной сетки. В программу были внесены необходимые изменения: продольная область, в которой рассматривается сгусток, теперь ограничена не периодом ВЧ поля, а несколькими длинами Дебаевского экранирования (обычно тремя-пятью) и теперь сгусток занимает значительную часть сетки и моделирование является более корректным. Однако проведенное моделирование показало, что и результаты, полученные с помощью BEAMDULAC-BL-Photogun нельзя считать пол-

ностью корректными для сгустков к зарядом более 1 нКл, так как программа дает завышенное влияние объемного заряда. Для сгустков с зарядом до нескольких сотен пКл результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

С 2014г. НИЯУ МИФИ участвует в коллаборации «будущего циклического коллайдера» – CERN Future Circular Collider (FCC). За это время была разработана концепция линейного ускорителя-инжектора для его лептонной версии FCC-ee [39]. Интенсивность пучка в ЛУЭ будет значительно различаться для двух режимов работы: для инжекционного режима достаточно иметь до $1,65 \cdot 10^9$ электронов в сгустке (заряд ~ 250 пКл), для режима электрон-позитронной конверсии необходимо до $4 \cdot 10^{10}$ электронов в сгустке ($\sim 6,5$ нКл), что является экстремальным режимом для ВЧ фотопушек. Предложенный ЛУЭ включает в себя фотопушку для генерации пучков со сравнительно низким зарядом и высокой яркостью, а также ВЧ пушку с термокатодом для сгустков с большим зарядом. Моделирование динамики было выполнено для обеих ВЧ пушек и регулярной части ЛУЭ [39]. Оптимизированная версия фотопушки Photogun_v3 может обеспечить эффективный захват сгустка, однако даёт большие потери электронов, составляющие 15-20 %, из которых примерно половина формирует обратный ток. Спектр пучка не удастся сделать лучше, чем ± 10 % FWHM. После этого было предложено отказаться от использования фотопушки для генерации 6 нКл сгустков и использовать ВЧ пушку с термокатодом. Полученные результаты также показали необходимость дальнейшего развития многочастичных моделей фотоэмиссии и программ, позволяющих учитывать коллективные эффекты в фотопушках.

В пятой главе рассматриваются программа и результаты исследования динамики электронов в кристаллах с возможностью моделирования излучения при каналировании. Эффект каналирования заряженных частиц в кристаллах был предсказан Й. Штарком [*16], обнаружен при численном моделировании [*17] и только затем экспериментально [*18]. Теоретическое описание данного эффекта было предложено Й. Линдхардом

[*19]. Излучение релятивистских электронов при каналировании в кристалле исследуется как с использованием квантового подхода, так и в рамках классической электродинамики с упрощенным представлением потенциала. В 2015 году в МИФИ была разработана программа BEAMDULAC-CR, в которой используется классическая модель, в которой форма эффективного потенциала максимально приближена к реальной [25, 30-31]. С помощью потенциала может быть определено электрическое поле в кристалле, а затем проведено численное интегрирование уравнений движения. Результаты расчета динамики электронов проходят постобработку, которая выполняется только для частиц, захваченных в режим каналирования. Определяется период осцилляций частиц и число колебаний, происходящих на длине кристалла. Далее зависимость производной скорости для каждой частицы раскладывается в ряд с помощью быстрого преобразования Фурье и определяются потери энергии на излучение и число излученных фотонов на один электрон (рис. 7-8). Для тестирования были использованы экспериментальные данные, полученные на ускорителе DALINAC (университет Дармштадта, Германия) и в Ливерморской национальной лаборатории (LLNL, США). Показано, что экспериментальные данные и результаты численного моделирования отлично согласуются между собой: при энергии электронов до 100 МэВ расхождение для величины максимально вероятной энергии составляет 3-4 %, при ГэВ-ных энергиях – не более 10 %.

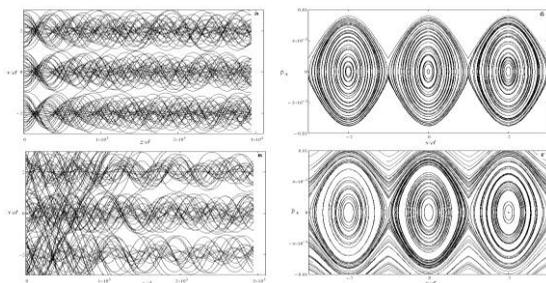


Рисунок 7 – Траектории электронов на плоскости $(z/d, x/d)$ для пучка с расходимостью 10 (а) и 30 мрад

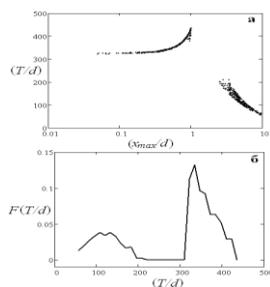


Рисунок 8 – Зависимость периода колебаний элек-

(в) и фазовые траектории в координатах (β_x , x/d), тронов в кристалле (T/d) энергия электронов 21 (а и б) и 23 МэВ (в и г) от амплитуды (x_{max}/d)

Далее рассмотрены методы оптимизации лазерно-плазменных каналов, позволяющие повысить коэффициент захвата электронов в режим ускорения при внешней инжекции и уменьшить спектр пучка [21-22, 32, 43]. Различные идеи повышения темпа набора энергии в ускорителях обсуждаются уже около 50 лет, одной из них является предложение Я.Б. Файнберга об ускорении пучка электронов в модулированном плазменном канале [*20]. Позднее было предложено несколько вариантов создания модулированного плазменного канала: с помощью яркого электронного сгустка с энергией несколько ГэВ или лазерного импульса (Т. Таджима и Дж. Доуссон [*21]). Ускоряющий градиент в таких каналах может составлять до нескольких сотен ГВ/м. Идея лазерно-плазменного ускорения стала очень популярной. В настоящее время в США, Европе и Японии работает несколько коллабораций, занимающихся теоретическими и экспериментальными исследованиями в данной области, однако до последнего времени не удалось пройти путь от «метода ускорения» к действующим установкам. При очевидном преимуществе данного метода, которым является возможность повышения на несколько порядков темпа ускорения, имеются и серьезные недостатки: низкий по сравнению с традиционными ВЧ ускорителями коэффициент захвата электронов в режим ускорения и плохой энергетический спектр ускоренных электронов. Практически ни одному из коллективов не удавалось в канале с постоянной плотностью плазмы получить спектр лучше 10 % в диапазоне энергий от десятков МэВ до ГэВ даже при численном моделировании. Возможным подходом к решению проблемы является использование предварительной группировки пучка. Впервые предварительная модуляция пучка при лазерно-плазменном ускорении была рассмотрена в работах С.В. Буланова с соавторами [*22]: предложено использование двух «участков» плазмы с постоянной (но не равной) плотностью, разделенных переходным участком с переменной плотностью плазмы («рампинг»). Численное моделирование

показало, что при изменении плотности плазмы по экспоненциальному закону можно улучшить энергетический спектр пучка примерно до 3 % при энергии 1 ГэВ. Для исследования динамики электронов в плазменном канале была разработана версия программы BEAMDULAC-LPWA. Рассматривался канал, состоящий из двух участков – группирующего с переменными параметрами и основного ускоряющего [21-22, 32] (рис. 9 а-б). Показано, что при синусоидальной зависимости распределения плотности плазмы группировка эффективнее, чем для экспоненциальной, предложенной в работе [*23]: может быть захвачено более половины частиц. На выходе основной части канала удастся получить спектр пучка не хуже 4 % при энергии 200 МэВ. Результаты были еще улучшены для схемы группировки пучка, когда группирующий участок разбит на несколько коротких (длиной несколько плазменных длин волн) секторов с плазмой, между которыми имеются дрейфовые промежутки (рис. 9в). Такая схема аналогична группировке пучка в многорезонаторном группирователе клистронного типа. В этом случае спектр пучка составляет 4 % при энергии 110 МэВ и 2,8 % при 200 МэВ (рис. 9 г). При моделировании был обнаружен и объяснен интересный эффект, связанный с быстрой дефокусировкой электронов, потерянных из режима ускорения и предложено несколько способов для предотвращения этого эффекта: модуляция плотности в канале и использование неоднородности (установка диафрагмы) для уменьшения скорости распространения плазменной волны [43].

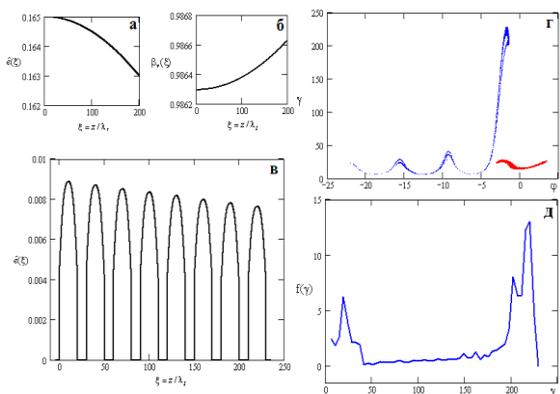


Рисунок 9 – Группировка пучка в лазерно-плазменном канале с переменной фазовой скоростью: варианты с «рам-пингом» (а-б) и «клиц-тронным» группирователем (в), для второго варианта показаны фазовые портреты после группирователя (красным) и основного участка (в) и спектр электронов на выходе канала

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Методы усреднения по быстрым осцилляциям обобщены на случай отсутствия в системе синхронной с пучком пространственной гармоники высокочастотного поля. Разработан подход к учету поправки на быстрые осцилляции скорости частиц в выражениях для частот колебаний частиц и акцептанса 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 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 резонансных ускорителях различных типов, каналах транспортировки и нелинейных средах.

4. Программы BEAMDULAC-RFQ и BEAMDULAC-DTL использованы в ходе разработки объединенной командой ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ и НИЯУ МИФИ нового фор-инжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для ускоритель-

ного комплекса «Нуклотрон»-NICA ОИЯИ, который запущен в 2015г.

5. Разработаны алгоритм и версия программы BEAMDULAC-2B для моделирования динамики пучка, состоящего из ионов нескольких типов. Показано, что в ускорителях с ПОКФ предельный поток квазинейтрального пучка может в 4-5 раз превышать ток пучка, состоящего из ионов одной зарядности. Для ЛОУ, в которых действующая на частицы сила квадратична знаку заряда, предельный поток определяется нелинейными эффектами объемного заряда и теоретически может достигать 10 А.

6. Разработан и создан канал транспортировки ленточных пучков ионов низкой энергии (работы по новым источникам для ионных имплантеров выполнены 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, дополнительно протестирована в ходе работ по модернизации ускорителя ЛУЭ-200 (ОИЯИ). Было показано, что двукратное отличие полученной энергии от проектного значения и широкий спектр пучка вызваны влиянием нагрузки током, которое не было корректно учтено в ходе разработки. Предложены методы улучшения параметров ЛУЭ-200, в частности – замена группирователя на более эффективный.

8. Для НПП «Корад» разработана серия ускоряющих структур для промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность до 20 кВт. В новой модели ускорителя на энергию 10 МэВ за счет использования адиабатического группирователя удалось добиться высокого (до 70 %) коэффициента токопрохождения, рекордного диапазона перестройки энергии (4-11 МэВ) и спектра пучка лучше ± 3 % FWHM в диапазоне энергий 5-10 МэВ. Для энергии пучка 10 МэВ и средней мощности 12 кВт удалось получить полный КПД около 20 %, что является в настоящее время лучшим результатом в мире. 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 пре-модуляции пучка можно получить спектр пучка не хуже 3 % при энергии до 200 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.

Список цитируемых источников

- *1 Van der Pol B. Radio Review, 1, p. 701, 1920.
- *2 Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. ЖТФ, т. 4, с. 117, 1934.
- *3 Боголюбов Н.Н. Избранные труды. Киев: Наукова думка, 1969.
- *4 Гапонов А.В., Миллер М.А. ЖЭТФ. т. 34, № 2, с. 242-243, 1958.
- *5 Масунов Э.С. ЖТФ. Т.60, № 8, с.152-157, 1990.
- *6 Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. Динамика частиц. М.: «Энергоиздат», 1982.
- *7 Масунов Э.С. Эффекты нагрузки током в ускорителях заряженных частиц. М.: Изд-во МИФИ, 1999.
- *8 Yaramyshev S. et al. NIM A, 558, p. 90, 2006.
- *9 He Y. Proc. of IPAC'17, WEXA1, 2017.
- *10 Samoshin A.V. Problems of atomic science and technology. Series Nuclear Physics Investigations, 4 (80), pp. 78 – 82, 2012.
- *11 Hagerman D.C. et al. Proc. of PAC'81, pp. 2910–2911, 1981.
- *12 Bondarev B., Durkin A.P. et al. Proc. of APAC'01, pp. 400-402, 2001.

- *13 Demsky M.I. et al. Proc. of RuPAC'06, pp. 372–374, 2006.
- *14 Jensen K.L. Journal of Applied Physics, 123, 045301, 2018.
- *15 Kraslinikov M. et al. NIM A, 871, pp. 97-104, 2017.
- *16 Stark J. Physikalische Zeitschrift, 13, 973, 1912.
- *17 Robinson M.T., Oen O.S. Phys. Rev., 132 (5), p. 2385, 1963.
- *18 Piercy G.R. et al. Phys. Rev. Lett., 10 (4), p. 399, 1963.
- *19 Lindhard J. Matematisk-fysiske Meddelelser udgivet af. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Bind, 34, nr. 14, 1965.
- *20 Файнберг Я.Б. Атомная энергия, т. 6, с. 431, 1959.
- *21 Tajima T., Dowson J.M. Phys. Rev. Letters, v. 43, 4, pp. 267–270, 1979.
- *22 Bulanov S. et al. Phys. Rev. E, 58, R5257, 1998.
- *23 Esarey E., Leemans W.P. Phys. Rev. E, 59, p. 1082, 1999.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ СТАТЬЯХ

- 1 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. Numerical simulation of 3D ion ribbon beam dynamics in RF undulator linac. Problems of atomic science and technology, #2, issue 43, p. 141-143, 2004.
- 2 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. Peculiarities of ribbon ion beam dynamics in the undulator linear accelerator. Problems of atomic science and technology, #1, issue 42, p. 134-136, 2004.
- 3 Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**. Ускорение и фокусировка интенсивных ионных пучков в высокочастотных структурах с использованием ондуляторов. Журнал технической физики, 75, 7, с. 112-118, 2005.
- 4 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, No 3 (47), pp. 119-121, 2006.
- 5 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, No 2 (46), pp. 123-125, 2006.
- 6 T.V. Kulevoy, **S.M. Polozov**, E.S. Masunov et al. Transport line for beam generated by ИТЕР Bernas ion source. Review of Scientific Instruments, 77, 03C112, 2006.
- 7 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, 558, pp. 184–187, 2006.
- 8 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. Space-Charge Neutralization in Ion Undulator Linear Accelerator. Proc. of PAC'2007, pp. 1565-1567, 2007.
- 9 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, No 5 (50), pp. 136-139, 2008.
- 10 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, No 5 (50), pp. 64-67, 2008.
- 11 A. Hershcovitch, T.V. Kulevoy, **S.M. Polozov** et al. Status of IТEP decaborane ion source program. Review of Scientific Instruments, 79, 02C501, 2008.
 - 12 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. High intensity ion beams in rf undulator linac. Physical Review ST AB, 11, 074201, 2008.
 - 13 Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**. Динамика двухкомпонентного ионного пучка в линейном ондуляторном ускорителе. Журнал технической физики, 79, 8, с. 93-98, 2009.
 - 14 E.S. Masunov, **S.M. Polozov**. The beam space charge neutralization in UNDULAC-E. Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations, No 2 (53), pp. 118-121, 2010.
 - 15 Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**, А.В. Самошин. Динамика тяжелоионного пучка в сверхпроводящем линейном ускорителе на малые энергии. Ядерная физика и инжиниринг, т. 1, № 5, с. 357-364, 2010.
 - 16 А.В. Воронков, Э.С. Масунов, **С.М. Полозов**, В.И. Рашиков. Расчет динамики пучка в ускорителях, работающих на бегущей волне, с учетом эффекта нагрузки током. Атомная Энергия, Т. 109, вып. 2, с. 84-89, 2010.
 - 17 **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), p. 131-136, 2012.
 - 18 **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, No 4 (80), p. 96-99, 2012.
 - 19 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, 3 (79), p. 53-57, 2012.
 - 20 Т.В. Бондаренко, А.Н. Диденко, **С.М. Полозов**. Ускоряющая система генератора электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. Ядерная физика и инжиниринг, том 4, № 8, с. 719-728, 2013.
 - 21 **S.M. Polozov**. A possible scheme of electron beam bunching in laser plasma accelerators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 729, pp. 517-521, 2013.
 - 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, No 6 (88), p. 29-34, 2013.
 - 23 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, No 6 (88), p. 114-118, 2013.
 - 24 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, No 6 (88), p. 8-12, 2013.
- 25 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, No 3 (91), p. 134-137, 2014.
- 26 **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, No 3 (91), p. 143-146, 2014.
- 27 I.A. Ashanin, **S.M. Polozov**, A.V. Samoshin. Beam Dynamics Simulation in SC Linac for the Proton Radiotherapy. Proc. of IPAC'14, pp. 3289-3291, 2014.
- 28 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, т. 117, вып. 4, с. 217-224, 2014.
- 29 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, т. 117, вып. 5, с. 278-287, 2014.
- 30 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, т. 43, вып. 2, с. 13-17, 2016.
- 31 Ю.А. Башмаков, Т.В. Бондаренко, **С.М. Полозов**. Генерация излучения в рентгеновском диапазоне при плоскостном каналировании релятивистских электронов в кристаллах. Журнал технической физики, 86, вып. 7, с. 118-123, 2016.
- 32 **S.M. Polozov**, V.I. Rashchikov. Capturing coefficient increase and energy spread decrease in LPWA. Journal of Physics: Conference Series 747, 012075, 2016.
- 33 **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 Элементарных частиц и атомного ядра», Т. 13, № 7 (205), с. 1418-1424, 2016.
- 34 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 Элементарных частиц и атомного ядра», №7, Т. 13, № 7 (205), с. 1425-1431, 2016.
- 35 Т.В. Бондаренко, **С.М. Полозов**, А.П. Сумбаев. Расчёт влияния нагрузки током ускоряющей структуры в ускорителе ЛУЭ-200. Письма в Журнал «Физика Элементарных частиц и атомного ядра», №7, Т. 13, № 7 (205), с. 1432-1437, 2016.
- 36 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», Т. 13, № 7 (205), с. 1418–1424, 2016.
- 37 W.A. Barth, T. Kulevoy, **S.M. Polozov**, S. Yaramyshev. Beam Dynamics Study for the New CW RFQ. Proc. of RuPAC'16, pp. 267-269, 2016.

- 38 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, pp. 173-175, 2016.
- 39 T.V. Bondarenko, **S.M. Polozov**. First Results of Beam Dynamics Simulation in electron injector linac for FCC-ee. Proc. of RuPAC'16, pp. 264-266, 2016.
- 40 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, pp. 188-190, 2016.
- 41 W.A. Barth, T. Kulevoy, **S.M. Polozov et al.** Beam Dynamics Study and Electrodynamics Simulations for the CW RFQ. Proc. of IPAC'17, pp. 1333-1336, 2017.
- 42 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.
- 43 **S.M. Polozov**, V.I. Rashchikov. Longitudinal motion stability of electrons inside the plasma channel of LPWA. Cybernetics and Physics, V. 7, No. 4, 228-232, 2018.