

## Отзыв

официального оппонента Павлова Юрия Сергеевича на диссертацию Полозова Сергея Марковича «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в диссертационный совет Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

В диссертации С.М. Полозова рассматриваются вопросы проектирования ускорителей электронов и ионов прикладного и научного назначения с высокой интенсивностью пучков. В частности, обсуждаются аналитические и численные методы исследования динамики пучков с учетом влияния собственных полей. Так как в настоящее время требования к интенсивности, фазовой плотности, спектру, эмиттансу и другим характеристикам пучка непрерывно растут, разработка новых методов для анализа динамики пучка остается актуальной.

Научная новизна работы включает разработку метода оценки поправки для поперечного аксептанса канала ускорителя, позволяющей учесть быстрые осцилляции частиц; программы для трехмерного моделирования динамики пучка в ускорителях электронов с учетом кулоновского поля и нагрузки током самосогласованным образом; модификацию алгоритма для учета кулоновского поля при моделировании динамики многокомпонентных ионных пучков; методы уменьшения спектра пучка при лазерно-плазменном ускорении.

Среди научных и практических результатов, полученных в ходе работы над диссертацией, следует выделить успешную разработку и запуск в серию новых линейных ускорителей электронов для НПП «Корад» и полученные экспериментально рекордные значения КПД; запуск нового инжектора для

ускорительного комплекса ОИЯИ; разработку и создание каналов транспортировки ленточных пучков для ионных имплантеров.

Диссертация состоит из введения, в котором представлен обзор литературы по методам и программам для исследования динамики интенсивных пучков заряженных частиц, в также представлены актуальность, постановка задачи, научная новизна, достоверность работы, пяти глав, заключения и списка литературы. В первой главе рассматриваются аналитические методы исследования динамики пучка. Приведены основные выкладки для методов усреднения уравнения движения по быстрым осцилляциям и рассмотрены особенности их применения для различных ускоряющих структур. Показаны возможности метода для нахождения условий устойчивого движения в ускорителях различных типов и аксептанса канала.

Во второй главе приведено описание численных методов и алгоритмов, и различных программ из семейства BEAMDULAC. Рассмотрены методы и алгоритмы учета нагрузки током и кулоновской компоненты собственного поля. Рассмотрены методы и результаты тестирования программ.

В третьей главе приведены результаты исследования динамики пучка в ускорителях ионов. Рассмотрены предложенные в МИФИ ускорители ленточных ионных пучков – линейные ондуляторные ускорители. Программа BEAMDULAC использована в ходе разработки ускорителя-инжектора с ПОКФ для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-НИСА ОИЯИ. Показано, что в структурах с ПОКФ, предназначенных для работы в непрерывном режиме, можно добиться стопроцентного прохождения пука при относительно низком потенциале на электродах. В ходе работы версия программы BEAMDULAC для структур с ПОКФ была дополнительно протестирована путем сравнения результатов с полученными при моделировании в программе DYNAMION. Исследована динамика пучка в нескольких ускорителях, построенных по модульному принципу. В этой же главе рассматривается возможность компенсации влияния объемного заряда



при наличии в пучке положительных и отрицательных ионов. Канал на основе электростатического ондулятора предложен для транспортировки ленточного пучка ионов при малых скоростях.

Четвертая глава посвящена ускорителям электронов. В частности, рассмотрена динамика в действующем ускорителе ЛУЭ-200 ОИЯИ и предложены методы оптимизации работы данного ускорителя. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных на ЛУЭ-200, позволило протестировать программу BEAMDULAC в версии для ускорителей электронов на бегущей волне. С использованием аналогичной программы, но для ускорителей на стоячей волне, в МИФИ для НПП «Корад» разработаны и в дальнейшем запущены в мелкосерийное производство в линейные ускорители прикладного назначения на энергию 2-10 МэВ и высокую среднюю мощность пучка. При запуске ускорителей на 10 МэВ и среднюю мощность до 15 кВт получен рекордный полный КПД выше 20 %. Рассмотрены особенности динамики коротких сгустков в СВЧ-пушках с фотокатодом и показана необходимость разработки новых фотоэмиссионных узлов при большой интенсивности электронов в сгустке.

В пятой главе рассматриваются программы и результаты моделирования динамики электронов при каналировании в кристаллах. Предложены методы оптимизации каналов лазерно-плазменных ускорителей, что теоретически позволит увеличить коэффициент захвата электронов и уменьшить в несколько раз спектр пучка.

В заключении перечислены основные результаты работы, а также приведены данные об их внедрении при создании ускорителей и каналов транспортировки пучка для ОИЯИ, ИТЭФ и НПП «Корад». Внедрение подтверждается соответствующими актами от перечисленных организаций, приведенными в конце диссертации.

Необходимо выделить следующие научные и практические результаты, полученные С.М. Полозовым при работе над диссертацией:

- Разработано и протестировано, в том числе при разработке доведенных до запуска ускорителей, семейство программ BEAMDULAC для численного моделирования динамики пучка в ускорителях электронов и ионов;

- Предложен и реализован канал транспортировки ленточных ионных пучков при низких ( $10^{-5}$  –  $10^{-4}$  скорости света) скоростях частиц, предназначенный для ионных имплантеров;

- Программа BEAMDULAC использована в ходе разработки нового инжектора для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-НИСА ОИЯИ;

- Разработана для НПП «Корад» серия ускорителей электронов прикладного назначения на различную энергию и среднюю мощность, которые к настоящему времени запущены в мелкосерийное производство. Ускорители отличаются высоким высокочастотным и полным КПД, узким энергетическим спектром пучка, малыми временами переходных процессов.

К недостатку данной работы можно отнести следующее:

Автор официально зарегистрировал в Роспатенте только одну из программ BEAMDULAC-multibunch-tw, остальные разработанные автором версии программы BEAMDULAC не зарегистрированы.

Сделанное выше замечание, разумеется, не снижает высокого научного уровня и практической значимости диссертационной работы.

Полученные результаты подтверждают, что диссертация Полозова С.М. является законченной научно-квалификационной работой, в ходе которой были получены новые важные научные и практические результаты. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Разработанные аналитические методы и программы для исследования динамики пучка прошли необходимую апробацию, в том числе – в ходе проектирования и запуска нескольких установок. В целом диссертация



соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует паспорту заявленной специальности 01.04.20. Автореферат в полной мере отражает содержание и результаты диссертации. Результаты работы опубликованы в большом числе статей, докладывались на основных российских и международных конференциях по ускорителям заряженных частиц.

Подводя итог, можно утверждать, что работа Полозова Сергея Марковича обладает необходимыми для докторской диссертации научной новизной, актуальностью, научной и практической ценностью и вносит большой научный и практический вклад в физику и технику ускорителей заряженных частиц. Она соответствует критериям Положения «О порядке присуждения учёных степеней» для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. По совокупности полученных результатов Полозов Сергей Маркович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент

доктор технических наук, заведующий лабораторией радиационных технологий, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН



Ю.С. Павлов

Контактная информация:

Павлов Юрий Сергеевич

доктор технических наук

заведующий лабораторией радиационных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук

119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4.

Тел. +7 (495) 955 4487, E-mail: rad05@bk.ru

Подпись Ю.С. Павлова заверяю:

Ученый секретарь ИФХЭ РАН

24 октября 2019г.



И.Г. Варшавская