

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по
научной работе АО «МРТИ РАН»

доктор физ.-мат. наук

« 9 »



И.И. Есаков

ОТЗЫВ

ведущей организации

Акционерного общества «Московский радиотехнический институт
Российской академии наук»

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

Актуальность исследования. Диссертация С.М. Полозова посвящена важной научной и технической проблеме современной ускорительной техники – разработке новых аналитических и численных методов исследования динамики пучков заряженных частиц, использование которых позволяет с высокой точностью предсказать параметры ускоренного пучка, полученные экспериментально в ходе запуска установки. Такие методы необходимы для изучения динамики в ускорителях научного назначения, в которых фазовая плотность пучка становится все более высокой и,

следовательно, нелинейные эффекты объемного заряда оказывают все большее влияние на движение и параметры пучка. Также корректное моделирование динамики необходимо и при проектировании ускорителей прикладного назначения, в которых на первый план выходит задача повышения высокочастотного и полного КПД ускорителя, что, в конечном счете, позволяет снизить стоимость эксплуатации установки.

Тема диссертации и содержание работы соответствует паспорту научной специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Автореферат в полной мере и корректно отражает содержание диссертации. Основные публикации автора по теме диссертации, список которых приведен в автореферате, корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения – актов о внедрении результатов работы в НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Объединенном институте ядерных исследований и НПП «Корад». Общий объем диссертации составляет 363 страницы.

Во введении описываются основные задачи современной ускорительной физики, связанные как с повышением интенсивности и фазовой плотности пучков заряженных частиц в ускорителях, предназначенных для научных исследований, так и с повышением КПД ускорителей прикладного назначения. Приведен подробный обзор аналитических методов и программ для численного моделирования динамики пучка.

Первая глава посвящена описанию аналитических методов, разработанных для исследования динамики пучка в ускорителях. Основной акцент сделан на методе усреднения по быстрым осцилляциям, применение

которого расширено на ускорители без синхронной с пучком пространственной гармоникой ВЧ поля и ускорители, построенные из отдельных коротких ускоряющих резонаторов. Большой интерес вызывает предложенный метод нахождения поправки к величинам частот продольных и поперечных колебаний и акцептанса канала ускорителя, основанный на сравнении динамики частицы в усредненном и полном поле.

Во второй главе рассматриваются численные методы исследования динамики пучков в ускорителях, использующиеся в программе BEAMDULAC. Необходимо отметить, что программа для трехмерного моделирования динамики пучков электронов в ускорителях на стоячей и бегущей волне самосогласованным образом (с учетом нагрузки током и кулоновского поля) разработана впервые. Для учета кулоновской компоненты собственного поля пучков, содержащих ионы с различным отношением заряда к массе, использован оригинальный алгоритм, представляющий собой модификацию хорошо известного метода быстрых преобразований Фурье (БПФ).

В третьей главе приведены результаты аналитического исследования и численного моделирования динамики пучков в ускорителях ионов. Рассмотрены различные типы линейных резонансных ускорителей: ускорители с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, ускорители с трубками дрейфа, системы, предназначенные для транспортировки и ускорения ленточных пучков, ускорители, состоящие из последовательности коротких независимо фазуемых резонаторов. Большое внимание в данном разделе уделяется сравнению результатов численного моделирования с экспериментальными данными, а также сравнению результатов, полученных с помощью программы BEAMDULAC и других общепризнанных пакетов. Необходимо отметить, что часть раздела посвящено результатам моделирования динамики ионного пучка в новом форинжекторе для ускорительного комплекса «Нуклотрон» ОИЯИ. Данный ускоритель был разработан объединенным коллективом сотрудников МИФИ,

ИТЭФ и ОИЯИ и запущен в 2015 году. Результаты моделирования, полученные автором с использованием разработанной им программы BEAMDULAC, совпали как с результатами моделирования по программам DYNAMION (ИТЭФ), LIDOS (МРТИ) и Toutatis (SEA Saclay), так и с экспериментальными данными, полученными в ходе запуска форинжектора. Также необходимо выделить уникальную разработку – канал транспортировки ленточного ионного пучка при скоростях 10^5 - 10^4 скорости света, доведенную до запуска. Канал транспортировки предназначен для работы в составе промышленных ионных имплантеров. На эти два результата получены акты о внедрении в ОИЯИ и НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ.

Четвертая глава посвящена результатам исследования динамики пучков в ускорителях электронов. Основное внимание уделено работам по серии новых промышленных ускорителей заряженных частиц, выполненным для Научно-производственного предприятия «Корад» (Санкт-Петербург). Были разработаны различные модели ускорителей на энергию от 2 до 10 МэВ при средней мощности в пучке от 2 (для ускорителя на 2 МэВ) до 20 (при 10 МэВ) кВт. Запуск серии ускорителей из шести штук показал отличное совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными, по итогам данных работ также составлен акт о внедрении. Кроме того, в данном разделе рассматриваются предложения по модернизации ЛУЭ-200 (ОИЯИ), а также особенности моделирования динамики в ускорителях с фотопушками, в том числе – в фотопушке с интенсивностью до 6 нКл/сгусток, разрабатываемой для проекта CERN Future Circular Collider (CERN FCC-ee).

В пятой главе рассматривается динамика электронов и их излучение при каналировании в кристаллах. Также предложено несколько методов оптимизации спектра пучка и повышения коэффициента захвата при ускорении электронов в лазерно-плазменном канале. Данный способ

ускорения в настоящее время в очередной раз рассматривается как перспективный путь увеличения темпа ускорения.

В заключении приведены основные результаты работы.

В целом необходимо отметить, что выполненные работы носят комплексный характер. Разработанные методы и программы используются как для теоретических исследований по новым методам ускорения, так и при создании реальных установок научного и прикладного назначения. По результатам исследования динамики пучка созданы новый инжектор для ускорительного комплекса «Нуклотрон» ОИЯИ, серия прикладных ускорителей электронов, каналы транспортировки ленточных ионных пучков для имплантеров. Запуск установок показал, что разработанные аналитические и численные методы позволяют с высокой точностью и достоверностью определять будущие параметры ускорителя на этапе проектирования.

В ходе работы автором получены следующие основные результаты:

1. Разработаны новые аналитические и численные методы и программы для моделирования динамики пучков в ускорителях. Программы позволяют моделировать с высокой точностью динамику пучка с учетом нагрузки током и кулоновского поля.

2. Программы BEAMDULAC-RFQ и BEAMDULAC-DTL использованы в ходе разработки нового фор-инжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-NICA ОИЯИ, запущенного в 2015г. и к настоящему времени являющегося основным инжектором в «Нуклотрон».

3. Для транспортировки ленточных пучков ионов низкой энергии предложено использовать щелевой канал на основе электростатического

ондулятора. Канал разработан и создан в ходе работ по новым источникам для ионных имплантеров.

4. Для НПП «Корад» проведено моделирование динамики пучка и разработана серия ускоряющих структур для промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность пучка до 20 кВт. К настоящему времени по результатам разработки запущена серия из шести ускорителей.

5. Разработаны алгоритмы и программы для численного моделирования динамики электронов в плазменных каналах и показано, что при использовании внешней инжекции и группировки пучка можно получить энергетический спектр не хуже 3 % при энергии до 100 МэВ и повысить коэффициент захвата в режим ускорения.

Результаты диссертации внедрены в Объединенном институте ядерных исследований, Научно-производственном предприятии «Корад» и НИЦ «Курчатовский институт» - Институт теоретической и экспериментальной физики.

Научная и практическая значимость результатов.

Выносимые на защиту положения и результаты являются новыми, тематика исследований, представленных в диссертации, имеет большую научную и практическую значимость в связи с необходимостью повышения характеристик ускоренных пучков заряженных частиц в установках научного и прикладного назначения. Значимость полученных результатов подтверждена также успешным запуском нескольких установок.

Достоверность и обоснованность результатов.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждается корректным использованием аналитических методов и методов математического моделирования, а также сравнением результатов расчета и моделирования с экспериментальными данными, полученными в

ходе запусков нового инжектора для ускорительного комплекса «Нуклотрон» ОИЯИ, серии ускорителей электронов, разработанных для НПП «Корад», и промышленных ионных имплантеров. В случаях, когда проверка результатов моделирования в ходе запуска собственных установок невозможна, результаты проверяются по экспериментальным данным, доступным из публикаций, или с помощью перекрестного моделирования другими хорошо зарекомендовавшими себя программами. Также работа прошла апробацию на различных научных конференциях, семинарах в ведущих ускорительных центрах России, Германии, Италии, результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

Работа не лишена некоторых недостатков:

1. Название диссертации выглядит слишком общим.
2. Во введении, при перечислении работников, внесших вклад в разработку методов исследования динамики пучка в линейных ускорителях, не указаны ряд сотрудников МРТИ (Бурштейн, Левин, Пироженко и другие).
3. Есть неточности изложения достижений МРТИ в части компактной установки радиационной стерилизации (КРТУ) в п. 4.3.4 диссертации: в действительности в установке "РАДУГА" используется относительно дешевый магнетрон, а не дорогостоящий клистрон, как ошибочно сказано в диссертации.
4. В положениях, выносимых на защиту, присутствуют формулировки слишком общего плана. Представляется, что в них должны быть указаны более конкретные результаты работы.

Отмеченные замечания не снижают, однако, научной значимости и практической ценности работы.

Заключение.


Диссертация С.М. Полозова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые научные и практические результаты в актуальной области ускорительной техники, проведенную с целью решения важных научных и практических задач.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы для использования в институтах НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, РФЯЦ ВНИИЭФ и других организациях ГК «Росатом», НИЯУ МИФИ, предприятиях концерна «Росэлектроника» и других организациях, разрабатывающих и производящих ускорители заряженных частиц и их компоненты, в том числе и в зарубежных ускорительных центрах.

В целом по актуальности, новизне, научной и практической значимости диссертация С.М. Полозова соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за разработку и внедрение новых аналитических и численных методов исследования нелинейной динамики пучков ионов и электронов в ускорителях заряженных частиц научного и прикладного назначения, подтвержденных сравнением с рядом экспериментальных данных.

Диссертация рассмотрена на заседании Научно-технического Совета Акционерного общества «Московский радиотехнический институт Российской академии наук» (117519, Москва, Варшавское шоссе, д. 132, т. +7(495)315-31-11, mrti@mrtiran.ru) 9 октября 2019г. Отзыв утвержден протоколом заседания НТС от 9 октября 2019г.

Отзыв составил
руководитель отделения АО «МРТИ РАН»
доктор физико-математических наук


08.10.2019

Розанов Н.Е.