

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)

12 декабря 2019г.

Заседание Диссертационного совета

Д 201.004.01

Протокол № 2019-5

Стенограмма заседания Диссертационного совета Д 201.004.01

Защита диссертации Полозова Сергея Марковича

«Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях»

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Председательствующий: председатель Диссертационного совета Д 201.004.01 доктор физико-математических наук, профессор Тюрин Николай Евгеньевич.

Секретарь: ученый секретарь Диссертационного совета Д 201.004.01 кандидат физико-математических наук Рябов Юрий Григорьевич.

Всего членов Диссертационного совета: 22 человека,

Присутствуют: 21 человек.

На заседании присутствуют:

1. Тюрин Н.Е., доктор ф.-м. н., 01.04.02 - председатель;
2. Зайцев А.М., доктор ф.-м. н., 01.04.23 - заместитель председателя;
3. Рябов Ю.Г., канд. ф.-м. н., 01.04.23 - ученый секретарь Диссертационного совета;
4. Арбузов Б.А., доктор ф.-м. н., 01.04.02;
5. Герштейн С.С., доктор ф.-м. н., 01.04.02;
6. Денисов С.П., доктор ф.-м. н., 01.04.23;
7. Зайцев Ю.М., доктор ф.-м. н., 01.04.23;
8. Иванов С.В., доктор ф.-м. н., 01.04.20;
9. Качанов В.А., доктор ф.-м. н., 01.04.23;
10. Козуб С.С., доктор ф.-м. н., 01.04.20;
11. Мочалов В.В., доктор ф.-м. н., 01.04.23;
12. Образцов В.Ф., доктор ф.-м. н., 01.04.23;
13. Петров В.А., доктор ф.-м. н., 01.04.02;

14. Петрухин А.А., доктор ф.-м. н, 01.04.23;
15. Разумов А.В., доктор ф.-м. н, 01.04.02;
16. Саврин В.И., доктор ф.-м. н, 01.04.02;
17. Сенько В.А., доктор ф.-м. н., 01.04.20;
18. Ткаченко Л.М., доктор ф.-м. н., 01.04.20;
19. Трошин С.М., доктор ф.-м. н., 01.04.02;
20. Федотов Ю.С., доктор ф.-м. н., 01.04.20;
21. Чесноков Ю.А., доктор ф.-м. н, 01.04.20.

Диссертационный совет Д 201.004.01 утвержден приказом на Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11 апреля 2002 года в составе 22 человек. На заседании присутствуют 21 членов совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, кворум имеется. На заседании также присутствуют официальные оппоненты доктор физ.-мат. наук, профессор Овсянников Дмитрий Александрович, доктор физ.-мат. наук Пармонов Валентин Витальевич.

Н.Е. Тюрин объявляет повестку дня: Сергей Маркович Полозов защищает работу «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» на соискание ученой степени доктора наук по специальности «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника». Юрий Григорьевич, пожалуйста, имеющуюся информацию.

Ю.Г. Рябов представляет материалы, имеющиеся в деле: С.М. Полозов, 1977 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук защитил в 2003 году в диссертационном совете при МИФИ. Диссертация Сергея Марковича принята к защите в нашем диссертационном совете 27.08.2019г. Совет утвердил официальными оппонентами Овсянникова Дмитрия Александровича, гражданина Российской Федерации, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой теории систем управления электрофизической аппаратурой Факультета прикладной математики – процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; Павлова Юрия Сергеевича, гражданина Российской Федерации, доктора технических наук, заведующего Лабораторией радиационных технологий Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН; Пармонова Валентина Витальевича, гражданина Российской Федерации, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Отдела ускорительного комплекса Института ядерных исследований РАН; ведущую организацию

– акционерное общество «Московский радиотехнический институт РАН». В деле имеются все документы, документы соответствуют требованиям ВАК для защиты докторских диссертаций.

Н.Е. Тюрин: Есть вопросы по этой части? Нет. Тогда Вам, Сергей Маркович, предоставляется слово для сообщения.

С.М. Полозов: Спасибо. Добрый день, уважаемые коллеги, добрый день, уважаемые члены диссертационного совета. Я хотел бы представить кратко основные результаты моей диссертационной работы «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях». Работа выполнена на кафедре Электрофизических установок МИФИ.

Актуальность диссертации связана с тем, что в настоящее время повышаются требования к пучкам как в серьезных научных установках, таких, как новые коллайдеры и источники синхротронного излучения, так и все время растут требования к относительно компактным установкам прикладного назначения, например источникам излучения различного диапазона (рентгеновского, излучения электронов, излучения терагерцового диапазона), интенсивных пучков протонов и потоков нейтронов. Фактически, основным требованием сейчас является не повышение его интенсивности, а повышение его яркости. Причем качество пучка, доступного на выходе крупного ускорительного комплекса, во многом определяется параметрами линейного ускорителя, который является инжектором или драйвером.

Целью моей работы являлось обобщение и систематизация результатов, которые я получил за последние 15 лет в ходе разработки аналитических и численных методов, алгоритмов и программ для численного моделирования динамики пучков электронов и ионов в линейных ускорителях, а также их апробации в ходе разработки, создания, запуска и модернизации нескольких ускорителей научного и прикладного назначения.

Научная новизна диссертации 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 биевения, а также современные ускорители, построенные по модульному принципу. Предложен метод нахождения поправок к выражениям для частот продольных и поперечных колебаний и аксептансов канала, полученных в гладком приближении, возникающих за счет быстрых осцилляций.

2. Разработано несколько программ для численного моделирования динамики в линейных ускорителях ионов и электронов, входящих в пакет, который мы назвали BEAMDULAC. В частности, в этом пакете впервые 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 была использована при моделировании динамики пучка при разработке ускорителя с ПОКФ – нового инжектора ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ. Запуск этого ускорителя показал хорошее совпадение результатов эксперимента и расчетных.

4. Подробно были изучены особенности динамики квазинейтрального пучка, включающего ионы одинаковой 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 пучка ионов при низких энергиях на основе плоского электростатического ондулятора. Канал был использован в ходе создания новых источников для ионных имплантеров и показал свою высокую эффективность при очень скоростях ионов порядка $10^{-5} - 10^{-4}$ скорости света.

6. Совместно с НПП «Корад» (Санкт-Петербург) разработаны и запущены в серию новые ускоряющие структуры для линейных ускорителей электронов прикладного назначения на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность в пучке 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 моделирования с данными нескольких экспериментов показало, что погрешность определения максимума спектра излучения – не более 5 % при энергиях электронов до 100 МэВ и 10 % при энергиях до нескольких ГэВ.

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

Практическая ценность работы подтверждается тем, что аналитические и численные методы были внедрены в ходе работ по реконструкции системы инжекции ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA ОИЯИ; была создана для НПП «Корад» серия промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и среднюю

мощность в пучке до 20 кВт; созданы каналы транспортировки пучков тяжелых и кластерных ионов для систем имплантации в полупроводники.

Достоверность полученных результатов подтверждается успешным запуском всех этих систем.

По результатам работы опубликовано 144 работы, в том числе 50 статей в журналах, из которых: 76 индексируются в Scopus, 43 – в Web of Science, 17 – в изданиях из списка ВАК.

Структура диссертации здесь показана.

Работа была апробирована за последние 15-16 лет практически на всех крупных российских и международных конференциях, а также неоднократно докладывалась на семинарах в МИФИ, ИТЭФ, Московском радиотехническом институте РАН, Объединенном институте ядерных исследований, Национальной лаборатории Фраскати, Центре по изучению тяжелых ионов в Дармштадте, университете Майнца.

Переходя к содержанию, первые две главы диссертации носят методический характер. Первая глава посвящена аналитическим методам исследования динамики пучков. В частности, основное внимание уделено методам усреднения по быстрым осцилляциям уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле и его анализу. Методы усреднения известны очень давно, они предложены еще Ньютоном и Остроградским для исследования механических систем. Для систем электродинамических, в частности для взаимодействия электронов с переменным электромагнитным полем, эти методы были впервые успешно использованы Гапоновым и Миллером в предположении малости быстро осциллирующей компоненты обобщенной координаты по отношению к медленной меняющейся части. Впоследствии в 80-е годы Масуновым было показано, что данное условие является достаточным, но не является необходимым. А необходимым является малость быстро осциллирующей компоненты скорости к медленной меняющейся. В таком приближении удается получить для любой системы уравнение движения в усредненном виде, в которое входит эффективная потенциальная функция, которая зависит только от медленно меняющейся обобщенной координаты и фазы частицы в поле волны, но в явном виде не зависит от времени. Выражения для эффективной потенциальной функции были получены как для ряда классических систем с синхронной с пучком пространственной гармоникой ВЧ поля, так и для ускорителей на волне биения, а также для новых систем, построенных по модульному принципу, то есть состоящих из последовательности одинаковых резонаторов, между которыми расположены какие-то фокусирующие элементы. Чаще всего это соленоиды, но иногда и квадруполь. В таких системах нарушается классический подход к синхронизму.

Дополнительно мы используем матричные методы на первом этапе проектирования, которые для линейных ускорителей не так популярны, как для циклических.

Рассмотрим несколько примеров того, что дает такой метод анализа динамики. Здесь показано сравнение эффективности ускорения и поперечной фокусировки для двух типов систем с высокочастотной фокусировкой: ускорителей с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и аксиально-симметричной высокочастотной фокусировкой. Здесь видно из параметров ускорения и условий устойчивости, что при меньших скоростях или меньших радиусах апертуры структура с АВФ имеет более высокий темп ускорения, однако поперечная фокусировка в АВФ более эффективна только при более высоких энергиях по сравнению с системой с ПОКФ.

Далее проанализирована динамика пучка в гладком приближении в так называемых линейных ондуляторных ускорителях. Эти ускорители были предложены в 1980х годах Э.С. Масуновым. Эти ускорители работают на волне биения, которая образуется при сложении двух волн, например основной гармоники ВЧ поля и одной из высших гармоник или одной гармоники ВЧ поля и одной гармоники электростатического поля. Здесь показаны сепаратрисы в предположениях, что взаимодействие частицы происходит с основной гармоникой ВЧ поля, первой высшей гармоникой и (черным) комбинационной волной. Два интересных момента было обнаружено для линейных ондуляторных ускорителей: сила, действующая на частицу, пропорциональна квадрату заряда, в нее входит произведение амплитуд гармоник, например, основной и первой высшей гармоник. Сила пропорциональна квадрату заряда и положительно и отрицательно заряженные ионы должны ускоряться физически в одном сгустке, хотя в фазовом пространстве они движутся в противоположных направлениях. И второй момент: такой ускоритель удалось разработать для ускорения ленточного пучка, то есть такого пучка, у которого один поперечный размер много больше другого. Внизу здесь показан один из примеров анализа динамики. Показаны частоты продольных и поперечных колебаний и рисунок позволяет сразу увидеть (зеленая кривая), что продольная частота и (синяя) поперечная совпадают и при определенных условиях можно получить резонанс продольных и поперечных колебаний.

Также с помощью комбинации метода усреднения и численного моделирования в полном поле удалось оценить поправку к аксептансу и частоте поперечных колебаний, которая была введена вот в таком виде еще Капчинским в учебнике 70-х годов, но нигде не было приведено методов ее численной оценки. На рисунке показана разница в гладком приближении и полном поле, то есть ту поправку, которую мы всегда оценивали в три или пять раз запаса, теперь есть возможность оценить численно достаточно точно.

Вторая глава диссертации посвящена методам, алгоритмам и описанию программы BEAMDULAC для численного моделирования динамики. Программа позволяет самосогласованным образом исследовать динамику. Квазистатическая компонента собственного поля находится с помощью решения уравнения Пуассона методом «облако в ячейке» с использованием быстрых преобразований Фурье. Нагрузка током, то есть высокочастотная компонента собственного поля находится прямым решением уравнением Гельмгольца методом, предложенным Масуновым для периодических ускоряющих структур на бегущей и стоячей волне. Программа BEAMDULAC имеет модульную структуру. Я не буду перечислять основные блоки. Могу сказать, что, вопреки общепринятому мнению, наиболее тяжелым блоком с точки зрения алгоритмов и программирования является не блок расчета собственных полей. Самым сложным является блок обработки результатов, потому, что он всегда пишется для каждой системы индивидуально и некоторые системы требуют очень тщательной работы для того, чтобы получилась результативная программа. Справа показаны блок начальных данных, структура ускорителя, которая задается по периодам, и некоторые результаты моделирования.

Ключевыми особенностями программы является возможность задания полей в правой части тремя способами: аналитически в виде однозначно определенных правых частей; в виде ряда (ряда Фурье-Бесселя) по пространственным гармоникам и в виде «реального поля», заданного на двумерной или трёхмерной сетке. Поле на трехмерной сетке может быть найдено двумя способами: при использовании программ для численного моделирования типа HFSS или CST или по результатам измерения в реальной созданной структуре. Для случая измерения сетки достаточно маленькие и приходится придумывать методы экстраполяции и интерполяции на этой сетке. Оказалось, что самым быстрым и самым эффективным методом здесь является очень старый метод взвешивания по площадям и, для трехмерно случая, по объемам. Он дает ошибку менее 0,5 % для двумерного случая и меньше 2 % для трехмерного. Для экстраполяции «за сеткой», так как измерения возможны только в очень узкой части апертуры канала, приходится использовать метод разложения Фурье в продольном направлении и разложение Фурье-Бесселя со сдвигом по координатам для поперечного направления.

Был разработан достаточно оригинальный алгоритм учета собственного кулоновского поля для случая, когда в пучке присутствуют ионы различных типов, например, с различными зарядовыми состояниями или отношением заряда к массе. Обычно используют отдельный расчет для каждого типа ионов и суперпозицию полей. Я предложил метод, когда для каждого типа ионов находятся коэффициенты Фурье и

дальше работа идет с коэффициентами вместо суперпозиции полей. Тогда получается учесть влияние одного типа ионов на другие.

Была разработана отдельная программа для учета влияния конструкционных погрешностей на динамику, там используется статистический метод.

За 20 лет, в течение которых мы занимаемся развитием программы, было написано большое количество различных версий, которые покрывают как все классические ускорители с квадрупольной высокочастотной фокусировкой, аксиальной высокочастотной фокусировкой, ускорители с трубками дрейфа и т.д. Также для систем, построенных по модульному принципу; ускорителях электронов на стоячей и бегущей волне; различных каналах транспортировки, в том числе предназначенных для ленточных пучков. Отдельная работа была сделана для плазменных ускоряющих каналов; кристаллов. Также важная программа для анализа влияния конструкционных погрешностей.

Несколько примеров. Система, называемая линейный ондуляторный ускоритель, для нее можно посмотреть темп ускорения в сравнении с другими ускорителями. Здесь показано, что при темп ускорения однозначно выше, чем в системах с ПОКФ, и при некоторых параметрах может быть сравним с темпом в структурах с аксиально симметричной ВЧ фокусировкой. Еще один важный результат, который здесь показан, был получен из-за того, что наш метод учета собственного кулоновского поля позволяет учитывать влияние проводящих стенок канала, то есть эффект экранировки собственного поля проводящей стенкой. Здесь показан предельный ток для линейного ондуляторного ускорителя, это ленточный пучок. Кривая 1 – с учетом экранировки, кривая 2 – без учета. Мы видим, что экранировка очень сильно уменьшает влияние собственного поля.

Второй пример, это результаты нашей разработки фор-инжектора для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-NICA. Эта работа была сделана и ускоритель запущен в конце 14 года. Работа делалась совместной командой ОИЯИ, МИФИ, ИТЭФ, а резонатор изготовлен в Снежинске ВНИИТФ. Программа BEAMDULAC здесь не являлась основной, больше использовался DYNAMION (ИТЭФ) и LIDOS (МРТИ). Но здесь показано сравнение, слева – BEAMDULAC, справа – DYNAMION, видно, что результаты одинаковые с точностью только до того, что в одном случае фаза $\varphi = kz - \omega t$, а в другом $\varphi = \omega t - kz$. Здесь видно резонатор на заводе до меднения, после меднения, и резонатор в момент его запуска на ускорителе в Дубне. Сложность этой машины в том, что она была сделана под новый источник поляризованных протонов и дейтонов, криогенный источник, который на тот момент не только еще не был сделан, он только начал разрабатываться. Систему с ПОКФ надо было вписать между несуществующим на

том момент источником и старым ускорителем ЛУ-20, причем при очень низкой энергии инъекции: 156 кэВ/нуклон. Тем не менее, это было сделано, ускоритель запущен и в сеансах 2016-2018 годов «Нуклотрон» работал с этим инжектором.

Третий пример – это ускоритель, построенный по модульному принципу. Здесь показан пример такого ускорителя, ускоритель на 1 ГэВ. В таком ускорителе не удается использовать один тип ускоряющих резонаторов, его приходится разбивать на несколько групп. В частности, здесь четыре группы сверхпроводящих резонаторов. Эта методика была разработана в начале 2000-х годов для ускорителя Rare Isotope Accelerator, это был проект Аргонской национальной лаборатории, который не был впоследствии реализован, но, тем не менее, методики работают. Эта методика, в частности, использовалась при проектировании следующего инжектора уже в NICA с использованием никовского бустера. Здесь показан рисунок, который к моей диссертации непосредственного отношения не имеет. Под эту работу мы начали осваивать технологии производства сверхпроводящих ускоряющих резонаторов, которых в России нет. Для этого была создана новая российско-белорусская коллаборация, которой в этом году первый резонатор был наконец-то сделан.

Существует три подхода к нейтрализации или снижению влияния собственного кулоновского поля на динамику: использование электронных облаков, плазменных линз или остаточного ионизированного газа; так называемый метод «сложения пучков» («funneling») и были работы по совместному ускорению положительно и отрицательно заряженных ионов в одном пучке. В начале 2000-х годов был очередной всплеск интереса к этой теме. В основном этим занимались японские, китайские и корейские авторы, которые использовали старую программу PARMILA/PARMTEQ, разработанную в Лос-Аламосе, которая использует очень старый метод равномерно заряженного эллипсоида, который не позволяет учесть влияние различных типов ионов на динамику друг друга., там используется суперпозиция полей. Во всех этих работах им удалось получить удвоение полного потока пучка, и авторы этим были вполне удовлетворены (хотя некоторым авторам удается получить результат и меньше двойки). Единственная работа, которая выбивалась из общего ряда, была работа Дуркина и Бондарева (МРТИ), которые на своей программе LIDOS, в которой честно учитывается собственное поле. Они получили, что в ускорителе с ПОКФ можно добиться утроения и даже учетверения потока. Это связано с тем, что на этапе группировки, где самая маленькая скорость и самый большой Кулон, положительные и отрицательные ионы еще пространственно не разделены. Почему они прекратили эту работу в МРТИ, я не знаю. Я начал эту работу примерно тогда же и удалось посмотреть как структуру с ПОКФ, где при определенных

условиях удалось получить полный поток в пять раз больше, чем для одного типа ионов. Для регулярной части, где пучок уже сгруппирован, действительно может быть только удвоение. Для ускорителя Альвареца тоже удастся поднять ток только в два раза. Причем здесь очень интересная динамика, которая показывает, что сгустки все равно чувствуют друг друга, несмотря на то, что пространственно они разделены достаточно далеко, видно перекачку продольного и поперечного движений.

Для линейного ондуляторного ускорителя, для которого все это и затевалось и у которого, напомню, сила, действующая на частицу, пропорциональна квадрату заряда, удалось показать, что частицы с одинаковыми массами, но противоположными зарядами, действительно физически группируются в одном сгустке. Но в фазовом пространстве они движутся в противоположных направлениях. Это дает возможность поднять полный поток пучка до фантастической величины порядка 10^4 А и более, что на настоящий момент не реализуемо ни для ионных источников, ни для систем ВЧ питания.

Был разработан канал транспортировки ленточных ионных пучков тяжелых и кластерных для систем ионной имплантации. Эта работа делалась совместно ИТЭФ, ИСЭ СО РАН, МИФИ, Брукхевенской национальной лабораторией и еще несколькими организациями. Задачей было создать ионные имплантеры под технологию 12 нм. Работа была сделана, для этого были разработаны источники со щелевыми каналами типа Берна и Фриман. Моей задачей в этом проекте было сделать канал транспортировки, который будет проводить пучок со скоростью в лучшем случае 10^4 скорости света до мишени на расстояние около метра. Работа была сделана, источники были запущены.

Четвертая глава – это ускорители электронов. В главе рассмотрены различные системы, например, предпринята попытка все-таки довести до рабочих параметров ускоритель ЛУЭ-200, который является драйвером электронного пучка для нейтронного источника «ИРЕН» ОИЯИ. Также исследовались различные фотопушки, в частности фотопушка для нового инжектора для Future Circular Collider в его лептонной версии.

Однако основное влияние уделено работе прикладной, которую мы сделали с Научно-производственным предприятием «Корад» по разработке новой серии линейных ускорителей электронов на энергию от 2 до 10 МэВ и среднюю мощность в пучке до 20 кВт. Базовая модель ускорителя, которую мы начинали разрабатывать, должна была обеспечивать регулировку энергии пучка в диапазоне 4-10 МэВ только за счет изменения мощности клистрона, с мощностью в пучке при 10 МэВ до 20 кВт, импульсный ток нельзя было поднимать по законодательным причинам выше 300 мА, спектр в диапазоне 5-10 МэВ не должен был превышать 2,5 % на полувысоте, мощность питания была ограничена доступными клистроном, то есть 5 МВт. Работа была сделана, здесь показано

несколько примеров таких ускорителей. Здесь в таблице приведены параметры: черным – расчетные, красным – экспериментальные данные для первого ускорителя, который был сделан для корейской компании EB-Tech, машина используется для стерилизации пищевой продукции, синим – тоже стерилизационный комплекс для медицинских изделий в Родниках Ивановской области. Видно, что по пиковой энергии мы попадаем с точностью около 1 %. Потребляемая мощность чуть-чуть выше, потому, что все-таки для изготовленной структуры добротность все-таки ниже, чем расчетная. Почти попадаем по электронному КПД, здесь разница до 2 %. Сейчас запущено уже шесть таких ускорителей: четыре на 10 МэВ (две для компании EB-Tech, одна для компании «АКЦЕНТР», г.Родники, одна стоит на новой площадке «Корада» в Санкт-Петербурге и используется для активационного анализа), еще одна секция на 8 МэВ запущена в Узбекистане для Навоийского горно-металлургического комбината, и одна маленькая секция на 2 МэВ, я могу показать, насколько она маленькая по сравнению с ускорителем на 10 МэВ, эта секция длиной 34 см, пока стоит на площадке НПП «Корада».

Пятая глава диссертации посвящена работам по динамике в достаточно нестандартных системах. В частности – при каналировании в кристаллах. Программа работает с использованием классического электродинамического подхода в приближении эффективного потенциала. Она позволяет посмотреть долю каналированных и деканалированных частиц. Отличие от эксперимента, сделанного в Брукхевене и в Дармштадте, составляет менее 5 % при энергии электронов меньше 100 MeV и 10 % при 1 ГэВ.

Еще один вопрос – это повышение эффективности ускорения в плазменных каналах, сформированных с помощью лазера. Эта идея очень старая, она предложена Я.Б. Файнбергом в 1959 году. В 80-м году Таджима и Доуссон предложили формировать такой канал с помощью лазерного импульса и вот уже почти 40 лет никому не удается не то, что в эксперименте, при моделировании получить спектр пучка на выходе лучше 3 % при энергиях в ГэВ, в эксперименте все еще хуже. Много различных способов повышения эффективности было предложено, в частности, так называемый «рампинг», когда участок с переменной плотностью плазмы расположен между участками с постоянной плотностью, пондеромоторная инжекция, двухволновое возбуждение канала в плазме и другие. Я попытался посмотреть, что здесь можно сделать и здесь, к сожалению, есть одна очень существенная проблема. Как известно, в классическом ВЧ ускорителе для того, чтобы оптимизировать два параметра, например, коэффициент захвата и спектр пучка на выходе, у нас есть два свободных параметра – фазовая скорость и амплитуда ВЧ поля. Меняя эти две зависимости по длине ускорителя, мы всегда можем добиться оптимизации

параметров на выходе. Для плазменного канала фазовая скорость и амплитуда поля, к сожалению для нас, оказываются связаны через плотность плазмы и здесь приходится придумывать что-то новое. Посмотрели «рампинг» с синусоидальной зависимостью, как это обычно используется в классическом высокочастотном ускорителе. Результаты получше, чем для линейной зависимости, но все равно недостаточны для создания реального ускорителя. Потом я предложил вот такой способ группировки, похожий на клистронный группирователь высокочастотного ускорителя, когда несколько участков с плазмой разделены свободными промежутками, в которых происходит дрейф электронов и они группируются. Этот способ позволил получить спектр пучка около 3 % уже при энергии 200 МэВ, а не 1 ГэВ. Было показано, что можно эффективно сгруппировать пучок в такой системе. Здесь очень интересное фазовое движение, очень много интересных эффектов. Был обнаружен очень странный эффект, он здесь проиллюстрирован. В классическом ускорителе частицы, вылетевшие по продольному движению из потенциальной ямы, фокусируются по поперечному движению и дрейфуют в канале ускорителя. Здесь получилась обратная ситуация. Видно, что частицы, вылетевшие из режима ускорения, быстро разлетаются на условные стенки канала. Оказалось, что это связано с тем, что форма потенциальной ямы здесь совершенно другая и за потенциальной ямой следует очень большая поперечная дефокусирующая сила, которая разбрасывает электроны.

Ну и в заключение я хочу показать основные положения, которые выносятся на защиту:

- Методики аналитического исследования динамики ионных пучков с использованием метода усреднения уравнения движения по быстрым осцилляциям, которые разработаны как для классических ускорителей с синхронной гармоникой высокочастотного поля, так и для систем на волне биения.

- Программы и алгоритмы для численного моделирования динамики пучка, включая реализованные впервые в мире алгоритм и программу для трехмерного моделирования самосогласованной динамики пучка электронов с учетом кулоновского поля и нагрузки током.

- Результаты моделирования динамики ионного пучка, полученные с помощью программы BEAMDULAC при разработке и создании ускорителя с ПОКФ – нового инжектора для ускорительного комплекса «Нуклотрон» - NICA.

- Результаты исследования динамики квазинейтрального пучка, включающего ионы равной массы, но противоположной зарядности, в том числе результаты

исследования особенностей группировки таких пучков и результаты оценки их предельных потоков.

- Результаты разработки канала транспортировки ленточного ионного пучка при низких скоростях частиц порядка 10^{-5} – 10^{-4} скорости света на основе плоского электростатического ондулятора, которые были успешно использованы при создании новых источников для имплантации.

- Результаты моделирования динамики пучка и разработки секций в целом для серии новых линейных ускорителей электронов для НПП «Корад» на энергию 2-10 МэВ и среднюю мощность пучка до 20 кВт.

- Версия программы BEAMDULAC-CR для каналирования, разработанная с использованием классического электродинамического подхода.

- Методы и схемы оптимизации лазерно-плазменных каналов, которые позволяют повысить коэффициент захвата частиц в режим ускорения при внешней инжекции и уменьшить спектр пучка.

Результаты диссертации внедрены и получены акты о внедрении:

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

- В НПП «Корад» при создании серии новых промышленных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ и создании шести работающих установок.

- В НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ в ходе работ по созданию ионных источников, используемых в имплантерах для полупроводниковой промышленности, канал был внедрен и успешно использован.

Здесь показаны первые страницы актов о внедрении.

Спасибо за внимание!

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Пожалуйста, вопросы.

С.В. Иванов: При расчете нагрузки током используется одна волна или в принципе можно учесть и паразитные?

С.М. Полозов: В ускорителе используется одночастотная, но в принципе можно учесть и многоволновое. Из основной программы она убрана, потому, что очень сильно растет время счета. Но методика позволяет учесть и высшие волны.

С.В. Иванов: То есть можно учесть и высшие волны?

С.М. Полозов: Да. Единственное, время счета растет как квадрат количества волн.

Ю.А. Чесноков: У меня два вопроса. По последним экспериментальным результатам, что касается излучения при каналировании, когда у Вас расхождение около 5 %, дело в том, что при таких энергиях каналирование отрицательных частиц очень быстро деградирует при толщине кристалла буквально 10 микрон. Поэтому эксперименты вряд ли могут быть чистыми, то есть излучение там определяется не только каналированными частицами, но и надбарьерными частицами и просто coherent bremsstrahlung. То есть вопрос в том, что эксперименты не могут быть чистыми. И второй вопрос по лазерно-плазменным ускорителям. В этом деле сейчас огромный прогресс и замечательные результаты, там получены энергии в ГэВ. И вопрос вот в чем. Здесь у Вас предложены очень важные идеи. Предлагали ли вы их для нашей экспериментальной установки в Нижнем Новгороде?

С.М. Полозов: Спасибо. По первой части – да, экспериментальных данных по каналированию достаточно мало. Моделирование показывает, что существенный вклад деканалирования и неупругого рассеяния начинается, конечно, не при 10 микронах, но при примерно 50 микронах. Единственный более-менее чистый эксперимент – это DALINAC в Дармштадте, где у них толщина мишени 56 микрон и с их результатами моделирование совпадает достаточно хорошо. Мы эту задачу решали в попытке найти одно прикладное применение – мы пытались сделать источник квазимонохроматического излучения для медицины. Для нас эта точность была достаточной. Что касается пучково-плазменного ускорения и лазерно-плазменного ускорения, то эти результаты были опубликованы, со стороны международного комьюнити к ним не было большого внимания. Результаты немного противоречат тем результатам, которые были получены в разных лабораториях. С нижегородской командой мы пока только пытались наладить взаимодействие. МИФИ вошел в коллаборацию суперлазера, но пока в части ускорения в лазерно-плазменных каналах – этот разговор еще не состоялся. Тем не менее, мы все-таки рассчитываем продолжить эту работу, потому что есть еще более простой способ. Он связан с установкой диафрагм в структуре, в которой будет затем развит плазменный канал. Есть идея от наших теоретиков, связанная с замагничиванием плазмы, то есть, фактически, с введением второго параметра оптимизации. Здесь очень большое поле для деятельности и хорошо, что в России может появиться своя установка для таких исследований. Но пока для практического применения еще очень-очень далеко, это связано с тем, что спектр пучка и, что самое главное, ни импульсная, ни средняя интенсивность пучка пока не пригодны для практической работы.

А.А. Петрухин: В пункте 9 Положения о защите четко прописано, что докторская диссертация должна представлять из себя научное достижение. Если кандидатская – это

решение научной задачи, то докторская – научное достижение. Как бы Вы сформулировали научное достижение? Интегрально?

С.М. Полозов: Разработан математический аппарат, включающий как аналитические методы, так и программы, которые полностью, полноциклово, позволяют проектировать ускоритель и давать результаты, которые затем совпадут с результатами запуска.

Н.Е. Тюрин: Вопросов больше нет? Спасибо. Давайте перейдем к оглашению результатов организации, в которой выполнялась работа и отзыва ведущей организации – МРТИ.

Ю.Г. Рябов: зачитывает заключение организации, в которой была выполнена работа – Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (есть в диссертационном деле).

Диссертация Полозова Сергея Марковича посвящена актуальной проблеме современной ускорительной физики – разработке и апробации новых методов исследования нелинейной динамики пучков заряженных части в ускорителях. Соискателем разработан ряд аналитических и численных методов, алгоритмов и программ для численного моделирования динамики пучков электронов и ионов в линейных ускорителях, а также выполнена их апробация в ходе разработки, создания, запуска и модернизации ускорителей научного и прикладного назначения. Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично, в частности:

- Разработаны методы усреднения по быстрым осцилляциям обобщены на случай отсутствия в системе синхронной с пучком пространственной гармоник высокочастотного поля.

- 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.

- Разработаны алгоритмы для численного моделирования самосогласованной динамики пучков заряженных частиц.

- Разработанные программы использованы в ходе разработки объединенной командой ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ и НИЯУ МИФИ нового форинжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-NICA Объединенного института ядерных исследований. В частности, с помощью этих программ разрабатывались стартовые версии канала нового ускорителя и выполнялась контрольная проверка динамики пучка.

- Разработаны алгоритм и версия программы BEAMDULAC-2B, которая позволяет моделировать динамику пучка, состоящего из ионов нескольких типов.

- Для транспортировки ленточных пучков ионов низкой энергии, в том числе кластерных, предложено использовать щелевой канал на основе электростатического ондулятора.

- Выполнено моделирование динамики пучка и разработаны ускоряющие структуры для серии ускоряющих структур для промышленных линейных ускорителей электронов на энергию 2-10 МэВ.

- С использованием классического электродинамического подхода разработаны алгоритмы и программа для численного моделирования динамики электронов при каналировании в кристаллах.

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

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.

Далее следует научная новизна. Практическая ценность подтверждается результатами внедрения. Апробация диссертации: результаты диссертации представлялись на международных и российских конференциях, таких как Международная ускорительная конференция, Европейская ускорительная конференция, Конференция по линейным ускорителям и так далее. Перечислены работы – 43, описан личный вклад автора.

Принято следующее решение:

Диссертация Полозова Сергея Марковича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Диссертация Полозова Сергея Марковича заслушана и одобрена на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Заключение принято на совместном заседании кафедры Электрофизических установок и Радиационно-ускорительного центра НИЯУ МИФИ от 22 мая 2019г. Далее – результаты голосования.

Зачитывает отзыв ведущей организации (есть в диссертационном деле). Ведущая организация – «Московский радиотехнический институт Российской академии наук» дала

положительный отзыв по диссертации Сергея Марковича. В отзыве приведены актуальность работы, содержание работы по главам и заключению. В ходе работы автором получены следующие основные результаты:

- Разработаны новые аналитические и численные методы и программы для моделирования динамики пучков в ускорителях.

- Программы использованы в ходе разработки нового фор-инжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для ускорительного комплекса «Нуклотрон»-НИСА ОИЯИ, запущенного в 2015г.

- Для НПП «Корад» проведено моделирование динамики пучка и разработана серия ускоряющих структур для промышленных линейных ускорителей электронов

Далее приведены научная и практическая ценность и достоверность результатов.

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, Пироженок и другие).

3. Есть неточности изложения достижений МРТИ в части реализации компактной установки радиационной стерилизации.

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. Диссертация была рассмотрена на заседании Научно-технического совета МРТИ РАН 09.10.2019г.

Имеются все необходимые подписи и печати.

Н.Е. Тюрин: Сергей Маркович, будете отвечать на замечания или согласитесь?

С.М. Полозов: с первыми тремя замечаниями, в целом, согласен. Четвертое замечание, как стало понятно из обсуждения на семинаре, относится к положениям 1 и 2, в которых отражены результаты методических исследований. Здесь привести какие-либо конкретные числовые результаты невозможно, это результаты разработки методик.

Ю.Г. Рябов: Также на автореферат диссертации Сергея Марковича Полозова получено шесть положительных отзывов (есть в диссертационном деле).

Н.Е. Тюрин: Шесть положительных отзывов – это хорошо. Здесь много прикладной части, так что вполне естественно. Спасибо. Переходим к выступлениям

официальных оппонентов. Первым слово доктору физ.-мат. наук Овсянникову Дмитрию Александровичу.

Д.А. Овсянников: Многоуважаемые члены совета. Уважаемый председатель. Мне кажется, что диссертация Полозова Сергея Марковича доложена достаточно хорошо и полно, если разрешите, я не буду полностью зачитывать свой отзыв. Диссертация на тему «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» посвящена разработке новых аналитических и математических методов и программ для численного моделирования динамики пучка в линейных ускорителях. Я бы хотел сказать, что работа очень многоплановая и содержит все необходимые аспекты, это теоретическая часть, как аналитические, так и численные методы создания программных комплексов, описание программ. В частности, методы усреднения уравнений движения по быстрым осцилляциям обобщены на случай ускорителя, в котором отсутствует синхронная с пучком пространственная гармоника высокочастотного поля и ускорителей, построенных по модульному принципу. Я хотел бы акцентировать. Здесь было показано, я не знаю, было это прочувствовано или нет, здесь очень хорошая математика. Я должен сказать, что я математик, но с 69-го года занимаюсь ускорителями. В школе Масунова Эдуарда Сергеевича и Полозова Сергея Марковича разработано очень много интересных моделей для динамики заряженных частиц в самых разнообразных ускорителях и это представляет очень большой интерес для моделирования. Эти модели достаточно простые и интересные. Это изумительные модели. Все мы помним модель прямоугольного зазора, которую все знают и с которой все мы работали. Она простая, но она очень хорошо проявляет многие особенности ускорителей и она до сих пор работает. В этих моделях интересно следующее: выражено движение так называемой синхронной частицы, а также исследуется совместное движение. Скажу вам, что в теории управления, в теории оптимизации, мы давно уже используем такую совместную оптимизацию так называемого программного движения, это не обязательно конкретная частица, это некоторое расчетное приближение, и динамика пучка в целом. С этой точки зрения я смотрю на их модели и думаю, что есть очень много очень-очень интересных. Дальше можно говорить о пакетах программ, которые очень сильно апробированы. Можно говорить об учете собственного поля на динамику и здесь нам Сергей Маркович хорошо рассказал об этом. Было рассказано, что используется, в частности, представление правых частей в виде соответствующих рядов Фурье, и это тоже вызывает большой интерес. Работа представлена на многих конференциях, и на которых я был, и на наших конференциях он

неоднократно был. Считаю, что публикации Полозова Сергея Марковича отражают результаты диссертации. По результатам получено свидетельство о регистрации программы. Разработанные численные методы внедрены при запуске новых ускорителей для ОИЯИ и «Корада», что является очень важным. Про актуальность я не буду говорить, и так все очевидно. То, что вынесено на защиту, я тоже опущу, все было достаточно хорошо сказано. Вот недостатки, на мой взгляд:

1. Не совсем полно раскрыты методы оптимизации параметров пучков в разных структурах. Желательны были бы более полные математические постановки проблем оптимизации.

2. Имеется ряд опечаток в диссертации, но я не видел диссертаций без опечаток.

Приведенные недостатки не снижают качества выполнения работы и важности полученных фундаментальных и прикладных результатов. Перечисленные выше результаты подтверждают, что диссертация Полозова является законченной научно-квалификационной работой. Результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Результаты являются достаточно весомыми. Работа соответствует всем требованиям для докторской диссертации. Необходимо еще раз отметить, что результаты моделирования динамики пучка прошли большую апробацию с использованием экспериментальных результатов и запущено в эксплуатацию несколько ускорителей. Результаты соответствуют паспорту заявленной специальности. Автореферат корректно и в полной мере отражает содержание диссертации. Таким образом, диссертация Полозова Сергея Марковича «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» представляет собой законченную работу, обладающую всеми необходимыми признаками научной новизны, актуальности, научной и практической ценности, имеющую существенное научное и прикладное значение в области теории ускорителей и динамики пучков заряженных частиц. Работа полностью соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а Полозов Сергей Маркович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Н.Е. Тюрин: Спасибо, Дмитрий Александрович. Коллеги, я забыл вам сказать, что Овсянников Дмитрий Александрович заведует кафедрой теории управления электрофизической аппаратурой на Факультете прикладной математики-процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета. Сергей Маркович, вам слово для ответа.

С.М. Полозов: Согласен. Пришлось чем-то жертвовать и для сокращения объема пришлось пожертвовать постановкой математической оптимизации.

Н.Е. Тюрин: Дмитрий Александрович, Вы согласны?

Д.А. Овсянников: Да, согласен. Более того, я думаю, нас ждет интересная совместная работа.

Н.Е. Тюрин: Спасибо большое. Теперь переходим ко второму выступлению. Отзыв доктора физ.-мат. наук Павлова Юрия Сергеевича, он заведует лабораторией радиационных технологий в Институте физической химии и электрохимии Фрумкина РАН.

Ю.Г. Рябов: Павлов отсутствует по уважительной причине. Отзыв имеется в деле. Зачитывает отзыв оппонента Ю.С. Павлова (есть в диссертационном деле).

В диссертации С.М. Полозова рассматриваются вопросы проектирования ускорителей электронов и ионов прикладного и научного назначения с высокой интенсивностью пучков. Научная новизна работы включает разработку метода оценки поправки для поперечного аксептанса канала ускорителя, позволяющей учесть быстрые осцилляции частиц. 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. Диссертация состоит из введения, в котором представлен обзор литературы по методам и программам для исследования динамики интенсивных пучков заряженных частиц. Далее приведено описание содержания глав диссертации. Перечислены основные результаты работы. 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 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;

- Разработана для НПП «Корад» серия ускорителей электронов прикладного назначения.

К недостатку работы можно отнести то, что автор официально зарегистрировал в Роспатенте только одну из программ BEAMDULAC-multibunch-tw, остальные разработанные автором версии программы BEAMDULAC не зарегистрированы.

Это замечание, разумеется, не снижает высокого научного уровня и практической значимости диссертационной работы. Диссертация Полозова С.М. представляет собой законченную научную работу, в ходе выполнения которой получены важные научные и практические результаты. 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. 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 ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Сергей Маркович, пожалуйста.

С.М. Полозов: С замечанием согласен.

Н.Е. Тюрин: Теперь у нас третий оппонент Парамонов Валентин Витальевич, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник отдела ускорительного комплекса, Институт ядерных исследований РАН. Пожалуйста, Валентин Витальевич.

В.В. Парамонов: Я буду говорить подольше. Мы ускорительщики и ускорители сейчас являются как инструментом для фундаментальных исследований, так развивается и их прикладное применение. Все время растут те требования к пучкам, которые надо поставлять пользователям для проведения эксперимента. Для получения новых результатов, в частности, сформировалась в последнее время тенденция на получение и ускорение пучков сверхвысокой яркости. В то же время для междисциплинарных исследований нам требуются мезонные, сейчас мезонные прошли, нейтронные источники. Там встают очень остро вопросы потерь частиц, вопросы радиационной частоты

ускорителя. И разработка таких ускорителей – она требует, вообще говоря, большого объема экспериментов. Вот здесь звучали слова «программа», а с моей точки зрения, сущность и содержание работы Полозова заключается в разработке методов исследования или моделирования динамики частиц, реализации их в программном обеспечении, проверке достоверности. И вот этот этап работы следует назвать «разработка средств численного эксперимента» по моделированию динамики частиц. Проверка результатов численного эксперимента с натурными – тоже неотъемлемая часть работы. Дальше – проектирование при разработке новых ускорителей, часть из которых уже пошла в дело и в то же время здесь мы видели очень интересные перспективные исследования. Поэтому содержание его работы я бы определил как разработка методов исследования, их реализация, верификация методов численного эксперимента и использование этих средств в разработке ускорителей. О содержании диссертации здесь много говорилось, я бы хотел сказать по первой части. Автор использует гамильтонов подход для исследования динамики, который сейчас является наиболее уважаемым методом. Реализованные методы и реализованные алгоритмы с использованием всех современных достижений реализованы в пакетах программ. Здесь следует подчеркнуть широту, функциональную широту, которую эти средства численного эксперимента могут решать: от динамики электронов и протонов, так и для тяжелых частиц при низких энергиях. Также решение задач с субрелятивистскими электронами и, что очень существенно, я не встречал таких программ, которые могли бы непосредственно, в лоб, опираясь на базовые уравнения, моделировать и рассчитывать самосогласованную задачу при движении, при динамике, электронных пучков при очень большой нагрузке пучком. Обычно те программы, которые на слуху у нас, которые мы называем сертифицированными, они более узко специализированы. Дальше, переходя к верификации и уже прикладным физическим результатам, которые к данной работе относятся, мне очень понравилась та часть, которая здесь при выступлении не прозвучала, это объяснение или исследование характеристик того, что Дубна получает в «ИРЕН». Потому что, во-первых, на этом очень четко проявляются новизна и возможности того, что сделал Полозов. Представьте себе, что если там ускоряется электронный пучок амперный, ведущее поле порядка 20 МВ/м или 30 МВ/м, а поле, наводимое пучком такого-же порядка, то аналитическими методами или линейными здесь мало, что можно получить. Те результаты, которые были получены Вами, в некотором смысле тривиальны для кого-то, ну не тривиальны а, я бы сказал – очевидны – проблемы «ИРЕН» связаны с тем, что для него нет паспортного клистрона. То есть поставьте клистрон достаточной мощности, обеспечьте ведущие поля и все у вас будет получено. Тем не менее, понять и разобраться в том, что происходит очень важно.

Далее, использование в серии прикладных машин «Корада» - насколько это все изъезжено. Сколько я себя помню в профессии, а это 45 лет скоро, ведется разработка прикладных ускорителей и малых ускорителей для промышленных применений. Но вот то, что удалось здесь сделать, опять же – с использованием более точных методов учета и взаимной оптимизации систем, то, что удастся повысить электронный КПД, то для промышленных машин, для прикладных машин, особенно для тех, которые идут в серию, этот небольшой выигрыш достаточно существенен, ни у кого этого нет. В разделе про исследование электронных пучков я бы хотел отметить активность, которая здесь не прозвучала и с которой нам часто приходится сталкиваться в рамках нашей коллаборации с DESY PITZ. Это формирование пучков высокой яркости на фотокаатодах, когда импульсом лазера из фотокаатода выбивается пучок с зарядом до единиц нКл. Этот пучок надо очень быстро укоротить, поэтому там развиваются поля в действующих сейчас источниках до 60 МВ/м, и в дальнейшем ускорить. Потому, что все проекты X-FEL и Future Circular Collider – они все требуют пучков сверхвысокой яркости. Оценка по X-FEL – существенную часть стоимости X-FEL занимают ондуляторы, которые длиной по 200-300 м и длина ондулятора обратно пропорциональна квадрату поперечного эмиттанта. Поэтому за это надо бороться и задачу надо начинать решать с самого начала, с инжектора. И мы видели и обсуждали на коллаборации работы, сделанные с участием соискателя. Там очень интересная физика, потому, что даже если из вот этого слоя попытаться вытащить нКл, то просто электронов может не хватить, которые в этом слое находятся. И надо учитывать весьма тонкие эффекты. Наверное, эта программа в дальнейшем будет развиваться, но, во всяком случае, я хотел бы отметить работу автора в этом направлении и связанные с этим возможности, которые они реализовали в средствах численного эксперимента. Теперь я бы перешел к адронным ускорителям. Автор перекрывает достаточно широкий круг, начиная от RFQ, который предназначен для энергий в несколько МэВ, до работ по ADS, для которых 1 ГэВ нужен и как раз здесь нужны чистые пучки с потерями не более 1 Вт/м радиационных, иначе просто не подойти к этому ускорителю будет. Здесь результаты автора реализованы в действующих, запущенных ускорителях, это фор-инжектор NICA. Пока протонных машин других нет, но активность автора в разработке других предложений и проектов для адронов, начиная от таких тяжелых, как в дубнинском проекте DERICA, они известны и актуальны. Это то, что касается содержания. Очень интересны также работы по каналированию. Если каналирование в кристалле, то кристалл можно рассматривать как ондулятор с очень коротким периодом. Но здесь у меня есть такой вопрос-замечание: автор честно признается, что эта работа выполнена в рамках классического подхода, не знаю, совпадает

с экспериментом или нет. Но вообще-то, справедлив ли классический подход здесь, для кристаллической решетки. В заключении сформулированы результаты.

Диссертация написана грамотным научным языком, материал хорошо оформлен и в достаточной степени проиллюстрирован. Хочется отметить корректность автора в ссылках на приводимые в работе результаты, полученные другими исследователями.

Теперь я хотел бы перейти к замечаниям по некоторым формулировкам. Для меня не совсем очевидной является такая формулировка: научной новизной является применение программы BEAMDULAC при разработке фор-инжектора. То, что этот пункт представляет несомненную практическую ценность с точки зрения верификации средств численного моделирования и эксперимента, это несомненно. Кроме того, я бы изменил формулировку выносимого на защиту положения, в котором говорится о новых ускоряющих структурах, пункт 6 «Научной новизны». Я бы предложил здесь пункт «ускоряющие системы», потому, что «ускоряющая структура» - периодическая, она известна. Новизна в том, что на основе разработанных средств и подходов проведена глубокая оптимизация характеристик структуры и динамики частиц, сформулированы требования к ускоряющей структуре, и все это вместе реализовано в семействе ускорителей прикладного назначения.

Значительных погрешностей научно-технического характера в диссертационной работе не обнаружено, но некоторые опечатки есть:

- на стр. 46, $h_n = 2\pi n/L$, n – написано волновой вектор.

Некоторые некорректности на странице 195. Утверждается, что в Лос-Аламосском ускорителе, там изложение надо переработать, до 200 МэВ там Альварец, после 200 МэВ - структура с боковыми ячейками связи. Поэтому там, где автор пишет, что структура Альвареца является классической системой для ускорения в диапазоне энергий 0,5-1000 МэВ в верхней оценке лишний ноль. Рабочий ток в ускорителе 17 А, а не около 100 мА.

К другим замечаниям по оформлению относятся: на Рис. 3.9а что-то уж очень подозрительно хорошо совпадают графики фактора пролетного времени для первой и второй кратности гармоник ускорения. Хотя бы в полтора раза они должны отличаться, а не на несколько процентов.

По существу диссертационного материала я замечаний не имею, по той тематике, которую автор выносит – нелинейная динамика пучка. Но в то же время сейчас область компетенций автора существенно шире, чем только вопросы динамики частиц. Он приводит в диссертации, не вынося на защиту, много материала. И здесь хотелось бы по вспомогательному материалу сделать некие замечания:

- стр. 209 и стр. 214, сформулировано «классическая секции SLAC-типа с видом колебания $2\pi/3$ ». В SLAC секции с постоянным градиентом, а секции Новосибирска, которые сделаны для «ИРЕН» – с постоянным импедансом, там будут несколько разные поля.

- На стр. 212 автор вступает в неразумную оживленную полемику по поводу того, какой вид колебаний там вообще. Это нисколько не влияет на результаты по исследованию динамики частиц, поскольку используются расчетные поля, но вид колебаний там $2\pi/3$, просто банчер настроен на вторую кратность. Не на основную, а на синхронную, получается $4\pi/3$.

Еще хотелось бы высказать в качестве пожелания для продолжения. Мы знаем об активности автора в коллаборации по разработке инжектора для проекта Future Collider в CERN. И там предлагается использовать ускоряющую структуру на стоячей волне совместно с системой умножения ВЧ мощности. Я бы в дальнейшем рекомендовал посмотреть это более подробно. Мне неизвестно такой комбинации, обычно умножение мощности используется с бегущей волной, которая не дает обратной.

Эти замечания относятся к дополнительному, по моему мнению, материалу диссертации и не влияют на высокую оценку защищаемого автором предмета диссертации. Совокупность результатов автора по разработке численных методов расчета нелинейной динамики частиц, реализации их в современном программном обеспечении, верификации путем сравнения как с результатами натуральных экспериментов, так и других численных, а также разработку с их использованием как реализованных, так и перспективных установок, следует квалифицировать как решение крупной задачи в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники. Автор широко известен как полностью сложившийся и авторитетный, активно работающий, специалист в области линейных ускорителей. Результаты имеют очень широкую апробацию в публикациях, как в индексируемых, как и из списка ВАК. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. Содержание диссертации также полностью соответствует паспорту специальности 01.04.20 по физико-математическим наукам, а также критериям, определяемым пунктом 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней в части докторских диссертаций. Ее автор Полозов полностью заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Число и подпись.

Н.Е. Тюрин: Спасибо большое, Валентин Витальевич. Вам слово, Сергей Маркович, для ответа.

С.М. Полозов: Спасибо. Прежде всего, хочу Валентина Витальевича поблагодарить за столь скрупулезный разбор моей диссертации. По замечаниям. С замечанием по формулировкам п. 3 и п. 6 «Научной новизны», в целом, согласен. Такая формулировка была бы еще более корректной. С отмеченными погрешностями оформления полностью согласен. График на рисунке 3.9 – это вторая кратность и показывает параметры по паспорту и уточненные в ходе моделирования.

По поводу замечаний по дополнительной информации могу сказать следующее. Когда коллеги из ОИЯИ попросили разобраться, что же у них все-таки получилось при запуске «ИРЕН» в целом, там были результаты, которые никак не сходились с проектными. Группирователь являлся наиболее сложным и загадочным элементом схемы, тем более, что вторая такая-же машина – запущенный в позапрошлом году инжектор для ВЭПП-4, который по структуре такой же, только на энергию повыше, они от такого варианта группирователя отказались. В целом, похоже, что группирователь ЛУЭ-200 вообще не влияет на динамику пучка, а где-то даже ухудшает параметры пучка. Параметры пучка – рекордно плохие, спектр пучка на выходе ускорителя до $\pm 20-30\%$. Падает коэффициент захвата, растет спектр пучка и максимальная энергия пучка даже не та, которая могла бы быть с этим клистроном. Похоже, что при проектировании ускорителя нагрузка током учтена некорректно. Здесь следует отметить, что классические ускорители SLAC-типа для инжекторов в источники синхротронного излучения и инжекторы уже достигли своего предела по спектру и надо что-то придумывать со стоячей волной. Наверное, мы все-таки попробуем поменять группирователь на работающий.

Относительно возможности использования систем компрессии ВЧ мощности в ускорителях на стоячей волне могу сказать, что такие работы в МИФИ проводились. Система типа SLED работала на резонаторную ускоряющую структуру. Критерием здесь является отношение добротности ускоряющей структуры и резонатора, в котором запасается мощность, но это экспериментально реализуемо. В наших ускорителях на 10 МэВ добротность 14-15 тысяч, а у резонатора, который работал в МИФИ на ускорителе У-17, имел добротность 94 тысячи, то есть условие много больше здесь выполнено. Естественно, будет 10-15 % отражение мощности от структуры, но этим можно пожертвовать из-за коэффициента усиления по мощности около четверки.

Н.Е. Тюрин: Хорошо, спасибо. Валентин Витальевич, Вы удовлетворены?

В.В. Парамонов: Да.

Н.Е. Тюрин: Переходим к дискуссии и обсуждению работы. Кто хотел бы высказаться?

С.В. Иванов: Я бы хотел довести до сведения членов диссертационного совета. Сергей Маркович проводил семинар у нас в Отделе ускорительного комплекса по этой тематике, но более расширенной. Я там не смог присутствовать, но общался с людьми, мнение позитивное с единственной разницей в тех условиях, в которых работают наши люди, обремененные и вынужденные заниматься конкретной установкой, и постановкой в высшей школе, где есть возможность свободной верификации работ, но отсутствует собственная научно-техническая база. Это, скорее всего, является бедой, но не позволяет приземлить некоторые исследования. Но а так, мало у кого вызывает сомнение большой объем проведенных исследований, у Сергея Марковича высокий квалификационный уровень и я призываю всех проголосовать за присуждение искомой степени, потому, что он долгие годы достаточно эффективно работает на кафедре 14 МИФИ в лаборатории динамики линейных ускорителей заряженных частиц, хорошо понимает специфику работы. Дополнительно, по внедрению: в тех условиях, в которых он работает, верификация была пройдена и несколько ускорителей работает.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Уважаемые члены совета, есть еще желающие?

А.А. Петрухин: Я хочу сразу сказать, что я не являюсь специалистом по ускорительной технике, но, во-первых, мы с Сергеем Марковичем работаем в одной организации и я немножечко в курсе дела, а, во-вторых, я уже 40 лет работаю в различных диссертационных советах, из них половину срока председателем, у меня взгляд и рука уже набиты. Это было уже давно, мы работали в совете совместно по двум специальностям – ускорители и физика частиц, и, я не помню точно сколько, но не один десяток диссертаций мы приняли. Правда, совет был кандидатский. Много защитили по ускорителям, так что для меня это все не какая-то абракадабра. С точки зрения оценки, конечно, труд солидный. Работа, которая была сделана, она очень большая и объемная и то, что сделал Сергей Маркович – это честь и хвала ему. Еще хотелось бы обратить внимание на один момент, по тому, как он отвечал на вопросы. Видно, что уровень доктора наук. Фактически мы имеем тот случай, когда нам просто нужно зафиксировать сложившуюся ситуацию. Он вырос как доктор и нам нужно только зафиксировать это. А вот что касается научного достижения, пункта 9, я скажу, когда мы будем заключение обсуждать. Это дело не столько диссертанта, сколько диссертационного совета.

Н.Е. Тюрин: Хорошо, спасибо. Ну что, еще кто-нибудь хочет высказаться? Нет. Тогда давайте дадим заключительное слово диссертанту. Пожалуйста, Сергей Маркович.

С.М. Полозов: Спасибо. В заключение я бы хотел бы, прежде всего, сказать спасибо своему Учителю, профессору Масунову Эдуарду Сергеевичу, которого уже много лет, к сожалению, нет с нами, за ту школу, которую получил я и многие другие специалисты по ускорителям. Также хочу поблагодарить своих коллег по кафедре Электрофизических установок МИФИ и всех коллег, с которыми довелось работать над этими проектами, из ОИЯИ, ИТЭФ, Корада, ИСЭ, GSI и других организаций.

Н.Е. Тюрин: Давайте выберем счетную комиссию для голосования. Предлагается комиссия: А.В. Разумов, В.В. Мочалов и С.М. Трошин. Предлагается утвердить. Приняли? Приступаем к голосованию.

Объявляется перерыв на голосование.

После перерыва.

Н.Е. Тюрин: Уважаемые коллеги, занимайте, пожалуйста, свои места и слово имеет председатель счетной комиссии А.В. Разумов.

А.В. Разумов: Комиссия в составе А.В. Разумов, В.В. Мочалов и С.М. Трошин. Комиссия создана для подсчета голосов по докторской диссертации Полозова Сергея Марковича «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных ускорителях» На заседании присутствовал 21 из 22 членов совета, из них по профилю рассматриваемой диссертации 6. Роздано бюллетеней - 21, осталось не розданных - 1, оказалось в урне бюллетеней - 21. Результаты голосования: «за» - 21, «против» - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Н.Е. Тюрин: Давайте утвердим Протокол счетной комиссии?

Диссертационный совет утверждает Протокол счетной комиссии.

Н.Е. Тюрин: Единогласно. Теперь давайте обсудим проект Заключения. Есть замечания? Предложения?

А.А. Петрухин: В Заключении нет ссылки на пункт 9 Положения. Обычно к конце пишется «за что».

Н.Е. Тюрин: Хорошо, правильное замечание. Исправим. Есть еще замечания?

А.М.Зайцев: У меня есть вопрос. Раньше объем Заключения был две страницы, теперь он приближается к диссертации. Здесь выписаны все замечания, так теперь принято?

Н.Е. Тюрин: Да, все меняется. Давайте с учетом высказанных здесь замечаний примем проект Заключения.

Диссертационный совет утверждает Заключение по диссертации.

Н.Е. Тюрин: Спасибо большое, единогласно.

Сергей Маркович, поздравляю Вас с успешной защитой и желаю Вам новых замечательных научных результатов.

Наше заседание окончено.

Заседание Диссертационного совета завершено.

Председатель Диссертационного совета
Д 201.004.01 доктор физико-математических
наук, профессор

Ученый секретарь Диссертационного совета
Д 201.004.01 кандидат физико-математических
наук


Н.Е. Тюрин
Ю.Г. Рябов