

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Полозова Сергея Марковича
на тему «Нелинейная динамика пучков ионов и электронов в линейных
ускорителях» на соискание ученой степени
доктора физико-математических по специальности 01.04.20 – «Физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника»

Ускорители заряженных частиц являются в настоящее время основным инструментом для исследований фундаментальных свойств материи в области высоких энергий. Прогресс в исследованиях стимулирует новые, все более жесткие требования к энергии, размерам и плотности ускоряемых сгустков, ассортименту ускоряемых частиц. Наряду с этим расширяется и применение ускорителей для прикладных задач, что требует оптимизации установки также и по эффективности.

Решение современных задач в разработке новых ускорителей заряженных частиц невозможно без применения средств численного эксперимента, в том числе средств численного моделирования самосогласованной динамики ускоряемых частиц с корректным учетом существенно нелинейных эффектов.

Сказанное выше определяет актуальность диссертационной работы С.М. Полозова, направленной на разработку численных методов расчета нелинейной динамики частиц, реализацию их в современном программном обеспечении, верификации путем сравнения как с результатами расчетов с использованием других, проверенных в разработках ускорителей программ, так и сравнением с результатами натурных экспериментов. Большим преимуществом разработанных средств численного эксперимента, определяющих как практическую ценность работы, так и достоверность полученных результатов, является их применение в разработке реализованных ускорителей, результаты натурных экспериментов на которых подтвердили достоверность результатов численных экспериментов.

Диссертационная работа С.М. Полозова состоит из Введения, пяти глав и Заключения.

Во Введении дается краткий обзор современных тенденций развития ускорителей заряженных частиц и подчеркивается направление усилий на формирование пучков высокой фазовой плотности. Приводится краткий обзор и анализ современных программных комплексов, зарекомендовавших себя в практике разработке ускорителей. Формулируются и приводятся основные научометрические характеристики работы – научная новизна, практическая ценность, достоверность и апробация результатов, выносимые на защиту положения.

В первой главе рассматриваются аналитические методы исследования динамики частиц в линейных ускорителях. В рамках гамильтонова описания, позволяющего применить развитые методы аналитической механики, и гладкого приближения, применяя усреднение по быстрым осцилляциям, для различных структур получены уравнения движения, различающиеся эффективной потенциальной функцией. Проведен сравнительный анализ динамики частиц для ускорителей с пространственно-однородной квадрупольной и аксиально-симметричной высокочастотной фокусировкой.

С применением развитого аналитического подхода с усреднением по быстрым осцилляциям, дополненным результатами численного моделирования, рассмотрена динамика частиц в различных схемах ондуляторных ускорителей с методически важным выводом о возможности получения большего, чем в структуре с ПОКФ, поперечного аксептанса. Завершается первая глава иллюстрацией примера выбора схемы построенного по модульному принципу ускорителя. Первичные оценки проводятся с применением матричного подхода, вносятся уточнения с использованием гладкого приближения и окончательный вариант определяется с использованием численного моделирования динамики в рассчитанных другими программами распределениях полей.

Числовые значения параметров динамики сгустков с учетом нелинейных эффектов наиболее точно получаются с применением прямого численного моделирования. Во второй главе кратко рассматриваются существующие методы решения самосогласованных задач моделирования движения частиц и приводится

описание алгоритмов, реализованных в разработанном программном обеспечении. Следует отметить реализованную возможность одновременного учета как квазистатических полей собственного заряда пучка так и электромагнитных полей, наводимым интенсивными пучками в ускоряющей структуре. Это позволяет применять разработанное программное обеспечение как для исследования динамики интенсивных сгустков ионов при малых скоростях, так и эффектов нагрузки пучком для релятивистских сгустков. Рассмотрены дополнительные возможности, заключающиеся в возможности расчетов движения частиц в многокомпонентном сгустке и проводить статистический анализ влияния точности изготовления и установки элементов ускоряюще-фокусирующего канала на параметры сгустков.

В третьей главе представлены результаты исследования динамики частиц ионов как в ряде предложений ускорителей ионов, так в реализованной установке, в разработке которых автор принимал непосредственное участие. Результаты в целом объединены общей последовательностью анализа – применением матричного подхода для формирования предварительной схемы ускоряюще-фокусирующего канала, последующим применением гладкого приближения для уточнения параметров и завершающим применением прямого численного моделирования движения частиц для получения окончательных результатов. Следует отметить результаты в разработке нового форинжектора легких ионов для ускорительного комплекса NICA и исследование динамики дейtronов в ускорителе ЛУ-20 ОИЯИ. Эти результаты в целом подчеркивают практическую ценность приводимых в диссертации результатов, а сравнение результатов автора с экспериментальными данными и с результатами расчетов с другой, зарекомендовавшей себя в разработках, программой DYNAMION подтверждает достоверность результатов автора. Практическое применение нашли результаты исследований автора в разработке с применением электростатических ондуляторов каналов транспортировки ленточных низкоэнергетичных пучков ионов для ионных имплантаторов.

Как результат анализа ускорителя построенного по модульному принципу, представляет интерес предложение сверхпроводящего линейного ускорителя для протонно-лучевой терапии. Эти результаты следует использовать для сравнительного анализа с предложениями нормально проводящих линейных ускорителей аналогичного назначения.

В четвертой главе представлены результаты исследований динамики электронов как в реализованных установках, так поисковые исследования.

Исследование сильной нелинейной нагрузки током в ЛУЭ 200 ОИЯИ позволяет объяснить полученные экспериментальные результаты при пониженной мощности ВЧ питания. Большой интерес и научную новизну представляют результаты расчетов и выводы о работе группирователя при нагрузке током выше 1 А.

Тщательная оптимизация и более точный учет сильной нагрузки током позволили разработать предложения семейства компактных ускорителей электронов прикладного назначения, отличающихся повышенным электронным К.П.Д.

Научную новизну и высокую актуальность имеют результаты автора в исследовании формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости с зарядом до 6 нКл для лазеров на свободных электронах и планируемых коллайдеров. Исследования в данном направлении ведутся во многих зарубежных центрах. В настоящее время общепринятых модели фото эмиссии при облучении катода интенсивными импульсами излучения лазеров и методов моделирования процесса формирования и быстрого ускорения сгустков электронов еще не существует.

Пятая глава в основном отражает активность автора в исследованиях процессов, выходящих за рамки установившихся классических задач в линейных ускорителях.

Исследования движения и излучения электронов в кристаллах представляют интерес как поисковые для сравнительного анализа методов получения когерентного рентгеновского излучения. В этих исследованиях периодическая

решетка кристалла фактически является аналогом ондуляторов для генерации излучения в современных лазерах на свободных электронах. На много порядков меньшая длина периода такого ондулятора естественно определяет высокую энергию генерируемых квантов излучения. Но в целом описание таких процессов, по видимому, находятся на границе применимости классических подходов.

Ускорение в плазме и в световой волне лазера относятся к новым методам ускорения, которые сейчас достаточно интенсивно исследуются. Это является поисковыми исследованиями, адекватность подходов и результаты которых проверит будущее.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Диссертация написана грамотным научно техническим языком. Материал хорошо оформлен и в достаточной мере иллюстрирован. Автор корректно ссылается на приводимые в работе частные результаты, полученные другими исследователями.

Однако замечания по формулировкам некоторых положений в диссертационной работе.

Я не считаю научной новизной **использование** программы BEAMDULAC при разработке нового инжектора с ПОКФ комплекса NICA ОИЯИ, пункт 3 Научной новизны. А результаты исследования динамики дейtronов в последующем ускорителе ЛУ-20 получены впервые. Также применение программы и сравнение с результатами расчета по другим программам, а, главное, с экспериментальными данными, несомненно является подтверждением практической ценности работы и достоверности результатов моделирования.

Также я не считаю научной новизной разработку новых ускоряющих структур, пункт 6 Научной новизны. Новизной является более точное исследование нелинейного влияния нагрузки большим током пучка и более глубокая взаимная оптимизация при расчете динамики пучка, выборе построения, параметров и режима работы структуры, с учетом выбора источника питания, приведшее к повышению электронного и общего к.п.д. ускорителя. А реализация разработок в серийном производстве и результаты сравнения расчетных и экспериментальных

данных являются несомненным подтверждением практической ценности работ автора и достоверности результатов.

Значительных погрешностей научно-технического характера в диссертационной работе не обнаружено.

Погрешности оформления присутствуют в незначительном, по отношению к объему диссертационной работы, количестве. Например, замеченные:

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

Лишнее n и скаляр h_n корректнее обозначить как волновое число;

- ускоренные до 200 МэВ пучки H^+ и H^- инжектировались в последнюю часть ускорителя LAMPF (структуры Альвареца) и совместно ...

В ускорителе LAMPF структура Альвареца применена до 200 МэВ и затем используется структура с боковыми ячейками связи.

- стр. 195 ЛУ Альвареца является классической системой для ускорения в диапазоне энергий 0,5-1000 МэВ.....

Лишний ноль в верхней границе оценки.

- стр. 195 Параметры ускорителя LAMPF DTL ... рабочий ток для протонов составляет около 100 мА ...

Рабочий ток в импульсе для ускорителя LAMPF DTL равен 17 мА.

К другим замечаниям по оформлению относятся:

- вызывают недоумение приведенные на Рис. 3.9а графики фактора пролетного времени для первой и второй кратности гармоник ускорения, противоречащие числам на стр. 156;

- наличие в фазовых портретах пучков на Рис. 3.15 гистограмм распределений, на других рисунках приводимых, повысило бы информативность для сравнения результатов расчетов по различным программам.

По существенному, защищаемому автором содержанию диссертации я замечаний не имею. Но область компетенции автора в настоящее время шире, чем только вопросы динамики частиц. В диссертационной работе он приводит большой объем дополнительной информации по другим вопросам, функционально связанным с динамикой при создании линейных ускорителей.

По этой дополнительной информации, приведенной в работе, имеются замечания.

- стр. 209 и стр. 214, ... секции SLAC типа с видом колебания $2\pi/3$...

Секции SLAC и секции ИЯФ СО РАН имеют одинаковую рабочую частоту, одинаковый вид рабочего колебания и одинаковую длину. Но секции SLAC выполнены с постоянным градиентом, а секции ИЯФ СО РАН – с постоянным импедансом. Поэтому распределения рабочего поля в них существенно различные.

- На стр. 212 автор вступает в оживленную полемику по поводу классификации вида колебаний $4\pi/3$ в группирователе и по результатам собственных расчетов определяет вид как $3\pi/4$.

Группирователь настроен на синхронное взаимодействие со второй гармоникой поля, которая в волноводной классификации описывается как гармоника $n=-1$ волны $2\pi/3$. Эта гармоника имеет набег фазы на ячейку $4\pi/3$. Колебание вида $3\pi/4$ при заданной длине ячеек группирователя синхронного взаимодействия с электронами при $\beta=0.695$ не обеспечивает. На результаты динамики частиц это различие в классификации не влияет, поскольку используется реальные распределения поля.

- стр. 212. ...Связь по магнитному полю осуществляется по оси структуры, что приводит к очень низкой групповой скорости ...и большому времени заполнения структуры ...

По оси структуры связь обеспечивается по электрическому полю. Принятое значение групповой скорости $0,02\text{с}$ является типичным в структурах на бегущей волне и выбирается для получения высокого темпа ускорения. А время заполнения секций в разы меньше времени нарастания поля в резонаторе на типе колебаний TM010.

- стр. 229. ... привело к уменьшению времени переходного процесса ..

По существующим представлениям, результатам, других исследователей и экспериментальным данным, время переходного процесса определяется

нагруженной добротностью резонатора. А вот качество переходного процесса действительно повышается с увеличением коэффициента связи в структуре.

- стр. 235. приводимые расчетные и экспериментальные величины добротности, 16600 и 14400, и эффективного шунтового сопротивления, 82,5 МОм/м и 80.0 МОм/м, не согласуются даже с учетом возможных погрешностей расчета и эксперимента.

В качестве пожелания для продолжения исследований рекомендуется провести дополнительный анализ предложения применения структур на стоячей волне в лептонном инжекторе проекта FCC. В настоящее время мне не известно примеров сочетания систем умножения ВЧ мощности и резонаторной нагрузки. Кроме того, возможность уменьшить время переходного процесса в БУС не согласуется с современными представлениями.

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 их с результатами натурных и других численных экспериментов, 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 физики линейных ускорителей.

Результаты работы имеют достаточную апробацию в публикациях изданий, входящих в перечень ВАК и более чем достаточную в публикациях, индексируемых в базах WoS и Scopus.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

(физико-математические науки), а также критериям, определенным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 в части докторских диссертаций, а ее автор – Полозов Сергей Маркович, полностью заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела Ускорительного Комплекса ИЯИ РАН,
Парамонов Валентин Витальевич


19 ноября 2019 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495) 850-4239, e-mail: paramono@inr.ru

Специальность, по которой защищены диссертации на соискание степеней к.ф.-м.н и д.ф-м.н: 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Адрес места работы:

117312, Москва, Проспект 60-летия Октября 7а,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук
Тел.:+7(495)850-4201; e-mail: inr@inr.ru

Подпись в.н.с. ОУК ФГБУН ИЯИ РАН Парамонова В.В. заверяю,

заместитель директора ИЯИ РАН


А.В. Фещенко

