

В диссертационный совет 24.1.162.02,
ИЯФ СО РАН
630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, д. 11

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Мануилова Владимира Николаевича

на диссертационную работу

Никифорова Данилы Алексеевича

**«Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном
индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных
элементах»**, представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии
наук, на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

Линейные индукционные ускорители (ЛИУ) в настоящее время являются уникальными физическими установками, обеспечивающими рекордные энергии (до 100 МэВ) и токи (несколько кА) формируемых ими электронных пучков при длительности импульсов вплоть до нескольких микросекунд. Указанные параметры открывают новые широкие возможности использования таких электронных потоков в различных перспективных областях науки и техники. В частности, большие мощности пучков (до нескольких сотен ГВт) позволяют надеяться на успешную реализацию сверхмощных источников субтерагерцового излучения, интерес к которым в последнее время сильно вырос. Наиболее простой и перспективной схемой генерации такого излучения представляется схема ЛСЭ, где первоначально прямолинейный электронный пучок попадает в ондулятор, приобретает

колебательное движение и далее за счет эффекта Доплера путем большого релятивистского преобразования частоты излучает в коротком миллиметровом или субмиллиметровом диапазоне длин волн. Однако реализация такой схемы излучения требует формирования ультрарелятивистских электронных пучков с очень малым разбросом продольных скоростей электронов и малыми паразитными пульсациями границ пучка, что является крайне нетривиальной задачей, учитывая огромную (в масштабе радиальных формирующих полей – десятки сантиметров) длину ЛИУ (десятки метров). Решению этой задачи и посвящена работа Данилы Алексеевича Никифорова. Поэтому тема диссертационной работы является несомненно актуальной.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 94 страницах, содержит 42 рисунка. Список литературы включает 61 наименование. Автореферат полностью соответствует содержанию работы.

Во **введении** обосновывается актуальность темы работы, формулируются цели и задачи исследования, а также обсуждается научная ценность и новизна результатов, их научная и практическая значимость. Также приводятся основные положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность результатов, приводятся сведения о личном вкладе автора и апробации результатов, о структуре и объеме диссертации. Обсуждаются основные физические эффекты, влияющие на качество формируемого электронного пучка.

Первая глава диссертации посвящена подробному описанию структуры ЛИУ. Основное внимание уделено вариантам ЛИУ с энергией электронов 5 и 15 МэВ. Описан как инжектор электронного пучка, так и система фокусировки, включающая в себя как аксиально-симметричные, так и квадрупольные магнитные линзы, а также система диагностики параметров электронного пучка.

Вторая глава посвящена поиску адекватных методов численного расчета динамики электронного пучка в поперечной по отношению к направлению его распространения плоскости, а также анализу различных факторов, влияющих на величину эмиттанса пучка. Несомненным достоинством этой части работы является вывод о возможности комбинированной методики расчета пучка, основанной на использовании различных численных моделей в разных областях формирования, ускорения и транспортировки электронного пучка, в частности, использование уравнений Капчинского – Владимирского для быстрого расчета огибающей пучка в ускорительном канале ЛИУ и транспортном канале. Такой подход, при удовлетворительной точности, позволяет радикально повысить скорость численного моделирования пучков с очень большим отношением длины пучка к его апертуре (порядка 2000) и на этой основе выполнить оптимизацию электронно-оптической системы. Большое внимание во второй главе уделено также детальному анализу факторов, приводящих к росту эмиттанса пучка. Отдельно проанализированы физические причины роста эмиттанса в электронной пушке, ускорительной секции и области транспортировки. Получены оценочные аналитические формулы для определения удельного вклада в возмущение эмиттанса для различных областей электронно-оптической системы. Указанные соотношения позволяют более наглядно и быстро проводить процесс оптимизации параметров электронного пучка.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию параметров электронного пучка в ЛИУ. Поставлен и доведен до успешного завершения целый ряд сложных экспериментов, среди которых эксперимент по восстановлению параметров пучка на выходе из электронной пушки, эксперимент по инъекции пучка в боковой канал разводки пучка и эксперимент по транспортировке и фокусировке пучка с энергией 15 МэВ, основанный на сочетании данных измерений и расчетов огибающей пучка по модели Капчинского – Владимирского. Измеренная величина эмиттанса

пучка с энергией 15 МэВ в конце ускорителя составила 550 п·мм·мрад, что является одним из лучших результатов для зарубежных установок подобного класса. Наиболее сложными и утонченными следует признать эксперименты, описанные в 4 и 5 параграфах главы. Первый из них посвящен коррекции центра масс пучка с помощью матрицы отклика на дипольные корректоры и наглядно показал возможность значительного (более чем в 2-3 раза) снижения отклонения центра масс от оси системы. Подобный метод был впервые применен для коррекции орбиты в ЛИУ. Второй эксперимент – по компрессии мощного ультрарелятивистского электронного пучка до размеров, пригодных для реализации ЛСЭ-генератора терагерцового диапазона. Здесь следует особо подчеркнуть успешную реализацию сложной системы сопровождения и сжатия пучка, обеспечившую 90% токопрохождение пучка. Следует отметить разнообразие и сложность примененных для определения характеристик пучка методов, что говорит о Д.А. Никифорове как об опытном и сложившемся экспериментаторе. Достоинством работы является также высококвалифицированное сочетание экспериментальных методик с опорой на результаты численных расчетов, что несомненно способствовало улучшению полученных в эксперименте параметров электронных пучков.

В целом работа производит хорошее впечатление. В ней решен ряд новых сложных научных задач, позволивших существенно улучшить параметры ультрарелятивистских электронных пучков, формируемых в ЛИУ, что открывает новые перспективы по их практическому использованию. Полученные результаты являются новыми. Их обоснованность и достоверность не вызывает сомнений. Достоверность основных положений и выводов диссертации обеспечивается применением апробированных методов численного моделирования, а также сравнением данных полученных на основе различных программ моделирования.

Вместе с тем, по диссертационной работе имеются следующие **замечания:**

1. Во введении недостаточно четко сформулирована сложность решаемых задач.
2. В изложении работы слишком большое внимание уделено чисто техническим вопросам (расстояния между линзами, величина индукции, угол поворота пучка в 24 градуса и т.д.). В то же время физика работы отдельных частей ускорителя описана недостаточно.
3. В диссертации уделено недостаточно внимания таким важным для численного моделирования проблемам, как выбор шагов сеток, их геометрия, оценка временного шага при моделировании. Указанная информация, несомненно, была бы полезна и другим исследователям, занимающимся аналогичными расчетами.
4. В диссертации не указано, в каком режиме работает инжектор (электронная пушка): в режиме температурного ограничения эмиссии или ограничения тока пространственным зарядом. Между тем, от выбора режима зависит как методика снижения эмиттанса пучка, так и методика численного моделирования. Хорошо известно, что моделировать режим ограничения тока пространственным зарядом при высокой точности гораздо сложнее.
5. При моделировании сложных систем часто используется так называемый метод «физической оптимизации», когда на основании простых физических (часто даже аналитических) моделей выбирается начальное приближение (геометрия системы), а потом проводится численная оптимизация, в процессе которой для вариации параметров опять-таки используются простые физические соображения. К сожалению, в диссертации недостаточно внимания уделено вопросу, на основании каких соображений выбирались начальные размеры оптимизированных ЭОС и почему и как менялись параметры этих систем при оптимизации. В частности в диссертации утверждается, что в области инжектора желательно иметь однородное распределение плотности заряда по радиусу. Казалось бы, это можно обеспечить путем соответствующего выбора профиля катода и формы анода,

которые влияют на локальную плотность тока. Но об этом в работе ничего не говорится.

6. При оценке роли шероховатостей эмиттера используется чересчур оптимистичная величина размера шероховатостей – 0.5 микрона. Представляется, что реальная величина шероховатостей может быть на порядок больше. Кроме того, непонятно, как этот фактор может повлиять на величину эмиттанса пучка, если пушка работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом, а полное ускоряющее напряжение даже в области пушки порядка сотен киловольт.

7. Несмотря на впечатляющие экспериментальные результаты, следует отметить, что при описании экспериментов главы 3 недостаточное внимание уделено физическим основам построения сложных многоэлементных систем формирования и транспортировки ультрарелятивистских электронных пучков.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не изменяют общего положительного впечатления о работе. В диссертации проведен большой объем работ как по теории формирования и сопровождения ультрарелятивистских электронных пучков, так и по экспериментальному их изучению. Выполненные исследования свидетельствуют о высокой квалификации автора и как физика-теоретика, умеющего грамотно применять физические модели разного уровня сложности, так и как физика-экспериментатора, владеющего разнообразными методами диагностики электронных пучков. Ее результаты, в частности, могут быть использованы при разработке разнообразных новых приложений мощных ультрарелятивистских электронных потоков, включая системы генерации когерентного субтерагерцового излучения. Результаты работы изложены в 3 статьях, представлены в 4 докладах на высокорейтинговых научных конференциях и семинарах.

Представленная на оппонирование диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научно-техническая проблема – разработка методов формирования, транспортировки и фокусировки мощных ультрарелятивистских электронных пучков в ЛИУ для различных научных и технических применений. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, является в целом самостоятельным, системно оформленным исследованием и представляет научный труд, имеющий существенное значение для физики и техники перспективных линейных индукционных ускорителей. Основные результаты диссертации многократно обсуждались на Всероссийских и международных конференциях с участием ведущих специалистов в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.

Диссертационная работа Никифорова Данилы Алексеевича «Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных элементах» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Мануилов Владимир Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Никифорова Данилы Алексеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность 01.04.03 – Радиофизика),
профессор кафедры квантовой радиофизики и электроники
радиофизического факультета ННГУ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, д. 23

Тел.: +79107982506, e-mail: mavnik1@yandex.ru

«06» сентября 2023 г.

 Мануилов Владимир Николаевич

Подпись Мануилова В.Н. заверяю
Ученый секретарь Ученого совета
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского





Черноморская Л.Ю.