

На правах рукописи



Никифоров Данила Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА
ЭЛЕКТРОНОВ В МОЩНОМ ЛИНЕЙНОМ
ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ
С ФОКУСИРОВКОЙ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ
ЭЛЕМЕНТАХ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Логачев — доктор физико-математических наук,
Павел академик РАН
Владимирович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Мануилов — доктор физико-математических наук, профес-
Владимир сор, Федеральное государственное автономное
Николаевич образовательное учреждение высшего обра-
зования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского», профессор

Ростов — доктор физико-математических наук, Федераль-
Владислав ное государственное бюджетное учреждение нау-
Владимирович ки Институт сильноточной электроники Сибир-
ского отделения Российской академии наук, за-
ведующий отделом

ВЕДУЩАЯ — Международная межправительственная органи-
ОРГАНИЗАЦИЯ зация Объединенный институт ядерных исследо-
ваний

Защита диссертации состоится «10» октября 2023 года в «14:00» час-
ов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной фи-
зики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального го-
сударственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физи-
ки им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на
сайте <https://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety24-1-162-02>

Автореферат разослан «16» августа 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математиче-
ских наук, профессор РАН



Лотов Константин
Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Линейные индукционные ускорители (ЛИУ) используются для получения электронных пучков с токами пучка несколько кА, энергией до 100 МэВ и длительностью импульса до 1 нс. Такие параметры выделяют ЛИУ среди остальных типов ускорителей и позволяют применять их для решения различных практически интересных задач. Так, ЛИУ давно применяются для генерации когерентного электромагнитного излучения. Развитие элементной базы силовой электроники (в частности, мощных транзисторов и конденсаторов) не только сильно упростило и удешевило системы питания ЛИУ, но и привело к возможности повышения частоты повторения импульсов (и, следовательно, средней мощности электронного пучка). Кроме того, развитие физики и техники сильноточных ускорителей позволило повысить качество электронного пучка. Последнее открывает возможность применения ЛИУ для генерации электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) диапазона. Эти обстоятельства и делают актуальной разработку ЛИУ с высоким качеством электронного пучка (малыми эмиттансами и энергетическим разбросом) для генерации ТГц излучения. Первый эксперимент с использованием индукционного ускорителя для генерации излучения по схеме ЛСЭ был проведен в исследовательской лаборатории NRL. В этом эксперименте была осуществлена генерация излучения на частоте 30 ГГц с импульсной мощностью 4 МВт, при измеренном КПД в 3%. Наиболее успешной реализацией ЛСЭ на базе ЛИУ был генератор, созданный в Ливерморской национальной лаборатории, на основе индукционного ускорителя ETA. В этих экспериментах использовался пучок с энергией 4.5 МэВ, током 1 кА и длительностью импульса 30 нс, который инжектировался в магнитный ондулятор с периодом около 10 см. В результате было получено излучение на частоте 34.6 ГГц с мощностью около 1 ГВт. Что касается России, то к наиболее значимым достижениям в этой области, можно отнести серию успешных экспериментов по высокоэффективной генерации излучения, проведенных при сотрудничестве ОИЯИ (г. Дубна) и ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). Эти эксперименты проведены на базе ускорителя ЛИУ-3000 при энергии электронов 0.8 МэВ, с током 200 А при длительности импульса 250 нс. При прохождении пучка в брегговском резонаторе в ондуляторном поле с периодом 6 см было получено излучение на частоте 30 ГГц при КПД на уровне 20 %.

Степень разработанности темы исследований

Основным требованием к используемому сильноточному РЭП в ЛСЭ является минимальный разброс по продольным скоростям электронов, ко-

торый обусловлен разбросом энергий электронов и эмиттансом пучка. Важнейшей задачей, стоящей в ходе транспортировки и ускорения пучка в структуре ЛИУ, является сохранение его яркости, которая характеризует плотность тока в поперечном фазовом пространстве пучка и временную стабильность поперечного положения пучка на протяжении всего импульса. С точки зрения поперечной динамики пучка в случае ЛИУ характерными эффектами, ухудшающими поперечную стабильность пучка, его яркость, а также приводящие к его полной или частичной потере вдоль ускорительного тракта, являются неустойчивость обрыва пучка (Beam Break Up) и “штопорное движение пучка” (corkscrew motion).

Помимо описанных выше эффектов, на качество пучка в ЛИУ влияют различные факторы, ухудшающие его эмиттанс. Важной частью ускорителя, в которой формируются характеристики пучка, определяющие его возможности к дальнейшему использованию, является инжектор, поскольку именно в нем вследствие умеренного релятивизма электронов объемный заряд пучка создает наибольшие по величине нелинейные поля. Кроме того, в эмиттанс пучка в инжекторе вносят заметный вклад следующие факторы: тип эмиттера электронов, рассеянные магнитные поля вблизи поверхности катода, нелинейности полей, создаваемых оптикой электронной пушки, абберации фокусирующих магнитных линз. Так, применение накаливаемых катодов вместо взрыво-эмиссионных существенно уменьшило эмиттанс на выходе из электронной пушки. Для компенсации магнитных полей на катоде успешно применяются специальные магнитные экраны и дополнительные магнитные линзы (антисоленоиды), направление индукции поля которых противоположно направлению поля ближайшей от катода фокусирующей линзы. Вклад в эмиттанс пучка за счет нелинейности электростатических полей, создаваемых оптикой пушки, минимизируется путем оптимизации формы электродов пушки, на основе результатов численного моделирования. Важным фактором, влияющим на поведение эмиттанса пучка в линейном ускорителе, является согласование инжекции пучка из инжектора в основной линейный ускоритель. Численное моделирование поперечной динамики интенсивного пучка в ЛИУ показало, что непосредственно после перехода пучка из инжектора в основной линейный ускоритель развиваются зарядовые колебания. Эти колебания в основном связаны с неоднородностью поперечного профиля распределения заряда в сечении пучка и в результате приводят к росту эмиттанса. Величина начальной неоднородности профиля зависит от геометрии формирующих электродов электронной пушки инжектора, а также от сферической абберации его первой линзы. Для того чтобы избежать данного эффекта, необходимо обеспечить правильное согласование поперечного распределения заряда и фазового портрета пучка. Такое согласование в случае линейного фокусирующего канала заключается в получении равномерного профиля плотности заряда и линейного фазового портрета в точке инжекции пучка в основной

линейный ускоритель. Возможность подобного согласования была численно продемонстрирована в данном диссертационном исследовании. Однако согласование пучка с магнитной структурой основного линейного ускорителя включает в себя не только получение равномерного распределения заряда и линейного фазового портрета, но и получение гладкой огибающей пучка (огибающая с минимальными биениями) на протяжении всего ускорителя. В современных ЛИУ сильные биения огибающей пучка являются важным механизмом, приводящем к значительному росту эмиттанса. Для настройки огибающей пучка с минимальными пульсациями требуется создание точной численной модели и ее верификация с помощью системы диагностики пучка. Эффективным решением для построения такой модели может являться использование модели Капчинского – Владимирского. В случае пучка большой длительности, распространяющегося в ЛИУ при незначительном воздействии продольных сил пространственного заряда, данная модель хорошо описывает огибающую пучка даже при наличии существенных неоднородностей в поперечном распределении заряда.

Из представленного выше краткого анализа следует, что без изучения поперечной динамики пучка и факторов ухудшения эмиттанса, а также разработки и калибровки электронно-оптической модели движения пучка в ЛИУ, соответствующей измеренным параметрам пучка, будет невозможно осуществить эффективную проводку пучка в ускорителе и достичь таких параметров пучка, которые бы обеспечили его необходимое качество.

Цели и задачи

Целью данной работы является построение электронно-оптической модели ускорительного комплекса на основе линейного индукционного ускорителя, а также экспериментальное и теоретическое исследование поперечной динамики пучка, результаты которого позволят обеспечить достижение необходимых характеристик пучка. Для достижения данной цели в рамках работы необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Обосновать применимость модели пучка (К – В) для описания огибающей пучка в ускорительном комплексе ЛИУ при наличии существенных нелинейных сил пространственного заряда пучка.
2. Проанализировать факторы прироста эмиттанса пучка в различных частях ускорительного комплекса ЛИУ.
3. Создать электронно-оптическую модель ускорительного комплекса ЛИУ на основе К – В модели пучка.
4. Реализовать транспортировку пучка в ускорительном комплексе ЛИУ в соответствии с построенной моделью.
5. Экспериментально исследовать параметры пучка в различных частях ускорительного комплекса ЛИУ.

6. Получить эмиттанс и энергетический разброс пучка, удовлетворяющих требованиям для использования этого пучка в качестве драйвера для генератора W-диапазона (150 – 300 ГГц).

Научная новизна работы

Научная новизна данной работы определяется прежде всего уникальной конструкцией ускорительного комплекса ЛИУ. В отличие от своих зарубежных аналогов этот комплекс обладает дискретной фокусирующей системой. Это означает, что каждый фокусирующий соленоид имеет небольшую длину по сравнению с расстояниями между ними, поэтому эффект перекрытия фокусирующих магнитных полей принципиально очень мал. Впервые была создана электронно-оптическая модель для линейного индукционного ускорителя с дискретной системой фокусировки. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность поворота пучка с током выше 1 кА на угол 24^0 в боковом канале сложной геометрии ускорителя ЛИУ с полным сохранением его качества. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность магнитной компрессии пучка с током выше 1 кА до диаметра 6 мм и последующей транспортировки сжатого пучка в системе ЛСЭ, предложенного в исследовании.

Личный вклад автора

Автор принимал определяющее участие на всех этапах расчета и создания численных моделей, в измерении параметров пучка для различных режимов работы ускорителя. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в проделанную работу. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Список публикаций, рекомендованных ВАК, приведенный в конце автореферата, содержит 3 работы. Авторский вклад соискателя в 1 и 2 статьи заключается в получении аналитических оценок роста эмиттанса пучка в различных частях ускорителя. Численное моделирование и аналитические расчеты, выполненные автором в этих работах, позволили оптимизировать электронную оптику пушки и обеспечить транспортировку пучка с сохранением его эмиттанса, необходимого для его дальнейшей фокусировки и транспортировки в магнитной системе ЛСЭ. Кроме того, во 2 статье описаны результаты эксперимента по успешной компрессии с последующей транспортировкой пучка в магнитной системе предложенного ЛСЭ. Данный эксперимент был подготовлен и реализован автором диссертации. В 3 работе соискателем описана транспортировка пучка в ускорителе с энергией до 5 МэВ и выполнено измерение его параметров. Здесь было показано, что численная модель ускорителя, созданная автором, позволила осуществить транспортировку пучка без потерь и с со-

хранением его качества, необходимого для его поворота на угол 24 градуса и последующей фокусировки до размера в 1.5 мм.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе проведены аналитические и численные расчеты различных факторов, влияющих на поперечную динамику пучка в линейном индукционном ускорителе. По результатам анализа были предложены изменения в конструкции электронной пушки. Реализация этих изменений позволит получить согласованный поперечный профиль и фазовый портрет пучка в точке инжекции в линейный фокусирующий канал основного линейного ускорителя. Указанное согласование является необходимым условием минимизации эффекта роста эмиттанса за счет релаксации поперечных зарядовых колебаний в интенсивном пучке.

Создана электронно-оптическая модель движения пучка в структуре ЛИУ; эта модель позволяет обеспечить транспортировку пучка в тракте линейного ускорителя без потерь и с сохранением его качества.

Согласно моделированию предложенной схемы ЛСЭ, при параметрах пучка, полученного на выходе из ЛИУ с дискретной фокусирующей системой, можно достигнуть эффективности передачи энергии от электронов пучка к генерируемому потоку излучения на уровне 2 - 3 %. Это обеспечивает достижение мощности масштаба 100 МВт в потоке излучения W-диапазона, что можно считать большим научным достижением вакуумной электроники.

Методология и методы диссертационного исследования

Для моделирования поперечной динамики пучка в индукционном ускорителе используются аналитические и численные методы. Результаты численных расчетов и аналитических оценок сопоставляются с экспериментальными данными, полученными с помощью системы диагностики пучка в ускорителе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Проведена оптимизация электронно-оптической системы индукционного ускорителя с фокусировкой пучка на сосредоточенных элементах на энергию 5 и 15 МэВ для различных токов пучка. Данная оптимизация позволила обеспечить транспортировку пучка с сохранением эмиттанса, необходимого для достижения размера пучка в смысле ширины на полувысоте не более 1.5 мм.
2. Экспериментально доказана возможность поворота и транспортировки пучка с током выше 1 кА на угол 24⁰ в транспортном канале

сложной геометрии ускорителя ЛИУ с сохранением характеристик пучка, необходимых для его компрессии до 1.5 мм.

3. Численное моделирование и аналитические расчеты динамики пучка в инжекторе ЛИУ позволили оптимизировать электронную оптику пушки, обеспечивающую равномерное распределение электронов пучка в его фазовом пространстве. Это распределение является необходимым условием для стационарного состояния пучка в процессе его ускорения в ЛИУ.
4. Фокусировка при помощи сосредоточенных элементов обеспечивает параметры пучка, удовлетворяющие к его использованию в ЛСЭ для генерации терагерцового излучения.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты исследований, лежащие в основе диссертации, докладывались автором лично и обсуждались на 4 международных и 2 российских конференциях: на 30-й Международной конференции по линейным ускорителям (г. Ливерпуль, Великобритания, 2020), на Азиатском форуме по ускорителям и детекторам (г. Новосибирск, Россия, 2021), на 46-й Международной конференции по терагерцовому излучению (г. Чэнду, Китай, 2021), на Международной конференции по физике плазмы (г. Стэйтлайн, США, 2021), на Всероссийской конференции по источникам мощного ионизирующего излучения (г. Снежинск, Россия, 2021), на Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (г. Нижний Новгород, Россия, 2022).

Основные результаты диссертационного исследования получены в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук в 2018–2022 годах. По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 3 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, и 4 – в сборниках тезисов докладов научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и списка иллюстративного материала. В заключении приводятся результаты выполненного исследования. Полный объем диссертации составляет 94 страницы, включая 42 рисунка. Список литературы содержит 61 наименование.

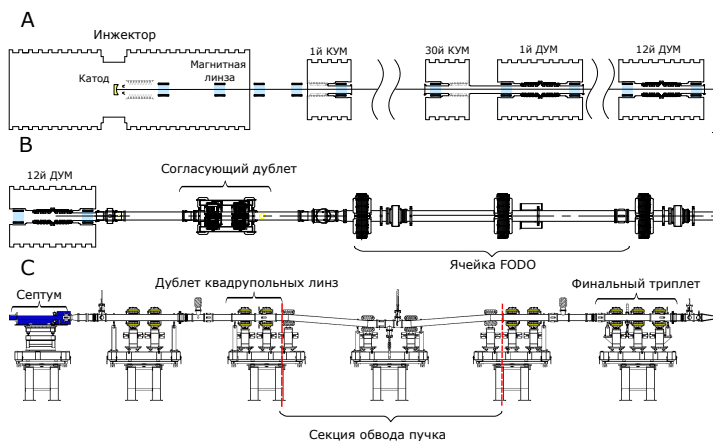


Рисунок 1 — Общая схема ускорительного комплекса ЛИУ: А - инжектор и линейный ускоритель, В - начальная часть канала транспортировки, С - финальная часть канала транспортировки

Основное содержание работы

Во введении представлен общий обзор экспериментов по генерации ТГц излучения с помощью пучка из ЛИУ. Описаны основные эффекты в поперечной динамике пучка, влияющие на эффективность генерации излучения. Обсуждена актуальность диссертационного исследования и сформулированы ее цели. Описаны структура и объем диссертации.

В первой главе подробно описана структура ЛИУ. Среди основных элементов структуры описаны следующие: инжектор электронов, система фокусировки и коррекции орбиты пучка, ускоряющая система, система диагностики пучка. Схема ускорительного комплекса ЛИУ, в которой содержатся все описываемые элементы, приведена на рисунке 1.

Первоначальное формирование интенсивного пучка в ускорительном комплексе ЛИУ происходит в его инжекторе. От свойств и конструкции инжектора во многом зависит качество пучка электронов. Для ускорительного комплекса был разработан инжектор со специальной электронно-оптической системой, которая обеспечивает малую величину эмиттанса пучка. Данная система состоит из катодного узла, находящегося под импульсным высоким напряжением отрицательной полярности, анода и ускоряющей секции. Электронный пучок с током выше 1 кА формируется в вакуумном диоде при напряжении на катоде до -1 МВ. Катод механически удерживается на высоковакуумном секционированном изоляторе. На выходе диода расположена ускоряющая трубка, представляющая собой секционированный изолятор из нескольких градиентных колец. Для равномерного распределения рабочего высоковольтного напряжения по секциям изолято-

ра используется резистивные делители напряжения. Ускорительная трубка обеспечивает ускорение сформированного в диоде пучка до энергии 2 МэВ.

Фокусировка пучка в инжекторе и линейном ускорителе осуществляется аксиально-симметричными магнитными линзами. Линзы представляют собой бронированные соленоиды длиной 200 мм по железу и наружным диаметром 220 мм.

На выходе инжектора электронный пучок имеет энергию до 2 МэВ, дальнейшее ускорение пучка производится тридцатью однотипными короткими ускоряющими модулями и двенадцатью длинными ускоряющими модулями. Короткий модуль включает в себя 16 одинаковых индукторов и ускоряющую трубку. Для уменьшения коэффициента связи пучка с дипольными модами электрического поля ускоряющего модуля, используются специальные экранирующие электроды, эффективно уменьшающие ускоряющий зазор. Максимальное ускоряющее напряжение для каждого КУМа составляет более 300 кВ. Схема короткого ускоряющего модуля представлена на рисунке 2.

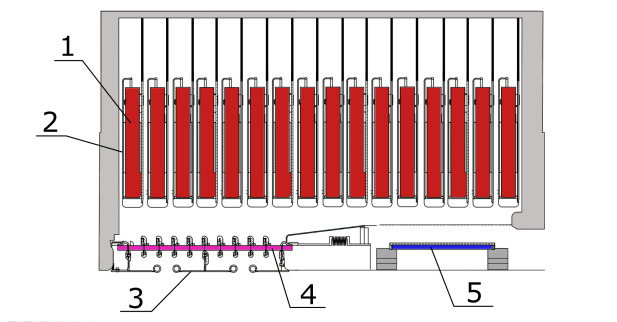


Рисунок 2 — 1 - сердечник индуктора, 2 - первичная обмотка, 3 - экранирующие электроды, 4 - ускоряющая трубка и 5 - магнитная линза

Длинный ускоряющий модуль увеличивает энергию электронов в пучке на величину выше 700 кэВ. Длинный модуль является наиболее оптимальным на финальной стадии ускорения в ЛИУ, где допускается более редкое расположение фокусирующих магнитных линз при хорошем разделении в пространстве участков ускорения и поперечной фокусировки. С точки зрения индукторной системы и конструкции высоковольтных элементов длинный ускоряющий модуль представляет собой сдвоенный короткий модуль с симметричным расположением ускоряющих трубок; таким образом, с учетом конструкции индукторов и ускоряющих трубок это полностью идентичные системы.

Магнитная система каналов разводки пучка включает в себя квадрупольные линзы, дипольные магниты и септум магнит. Для поворотов пучка в транспортных каналах разводки используются дипольные магниты. Такие магниты обеспечивают отклонение пучка в канале на угол 12° . Септум магнит служит для поворота пучка в боковой канал. Пучок, отклоненный кикером от прямолинейной траектории, набирает поперечное смещение в прямолинейном промежутке. Далее, отклоненный пучок попадает в апертуру септум магнита и отклоняется в нем на угол 24° .

Система диагностики осуществляет контроль различных параметров пучка, а именно: энергии электронов пучка, тока пучка, поперечное положение центра масс пучка, профиля плотности заряда в поперечной плоскости. В инжекторе ток пучка измеряется двумя импульсными трансформаторами тока. Первый из них расположен на выходе электронного пучка из диода, а второй – на выходе из инжектора. Далее в линейном ускорителе трансформаторы тока установлены внутри каждого из 54 ускоряющих модуля. Для измерения зависимости поперечного положения пучка от времени на выходе из инжектора и в последующем ускорительном тракте используются широкополосные полосковые датчики (пикапы), которые установлены после каждого второго ускоряющего модуля. Для контроля поперечного профиля плотности заряда пучка в конце линейного ускорителя установлен датчик переходного излучения на основе титановой фольги толщиной 50 мкм. Трехмерная модель датчика переходного излучения с отпечатком пучка представлена на рисунке 3.

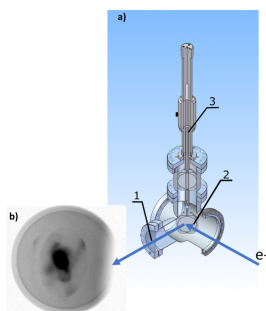


Рисунок 3 — (а) Трехмерная модель датчика переходного излучения: 1 – смотровое вакуумное окно, 2 – детектирующий экран, 3 – вакуумный ввод на магнитной подвеске и (b) отпечаток пучка с током 1 кА на датчике переходного излучения

Для измерения высоковольтных импульсных напряжений в диоде инжектора, а также в ускоряющих модулях, используются резистивно-емкостные высоковольтные делители. Суммирование амплитуд напряжений этих делителей позволяет измерять набор энергии пучком, начиная

от диода и заканчивая последним ускоряющим модулем ЛИУ. Из анализа колебаний сигнала ускоряющего напряжения в течение полочки импульса тока оценивается величина изменения энергии электронов пучка на протяжении импульса тока. На рисунке 4 (А) представлены формы высоковольтных сигналов с делителей напряжения, установленных в ускоряющих модулях, при наличии подгрузки током пучка (уменьшение величины импульса в центре соответствует выходу тока пучка на стационарный режим), на рисунке 4 (В) представлены суммарные сигналы после каждого пяти ускоряющих модулей.

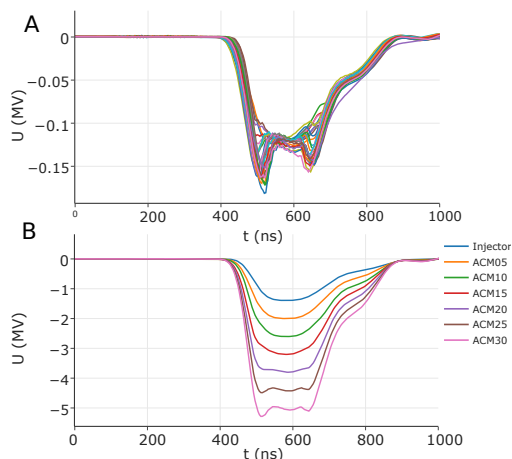


Рисунок 4 — Формы высоковольтных сигналов, полученные с делителей напряжения в ускоряющих модулях: А - формы высоковольтных сигналов с делителей напряжения, В - суммарные сигналы после каждого пяти ускоряющих модулей

Вторая глава посвящена обсуждению методов моделирования поперечной динамики электронного пучка с учетом эффекта пространственного заряда. Также во второй главе проводится подробный анализ различных факторов роста эмиттанса пучка в инжекторе, линейном ускорителе и боковых каналах разводки пучка.

Для моделирования динамики пучка и настройки ускорителя обычно используется несколько вычислительных программ, которые учитывают разные факторы, влияющие на динамику пучка. В ИЯФ СО РАН были разработаны различные коды для расчета динамики пучка в ЛИУ: KENV (расчет огибающей пучка с использованием модели К – В), BEAM (PIC-код для расчета эмиттанса пучка), UltraSAM (код для расчета мощных электронных пучков на основе граничных интегральных уравнений). Рас-

чет параметров электронного пучка от катода до финальной линзы в ускорителе ЛИУ делится на следующие этапы:

1) С помощью программы UltraSAM осуществляется расчет эмиссии, а также динамики пучка в инжекторе, где влияние пространственного заряда пучка имеет определяющее значение, а применение парааксиального приближения невозможно.

2) Для быстрого расчета огибающей пучка на всем протяжении ускорительной части ЛИУ, а также в транспортном канале, используется код KENV. Начальные условия, а именно: ток, энергия, эмиттанс, поперечный размер и угол наклона пучка – экспортируются из программы UltraSAM.

3) Для изучения и оптимизации эволюции эмиттанса пучка применяются коды UltraSAM и BEAM. PIC-коды UltraSAM и BEAM предназначены для расчета только аксиально-симметричных систем, поэтому расчет транспортных каналов, где используются квадрупольные линзы, а также расчет финального фокуса осуществляются в коде KENV.

Результаты расчета огибающей, выполненные в коде KENV, представлены в верхней части рисунка 5, в нижней части этого рисунка показано распределение фокусирующих и ускоряющих полей. В верхней части

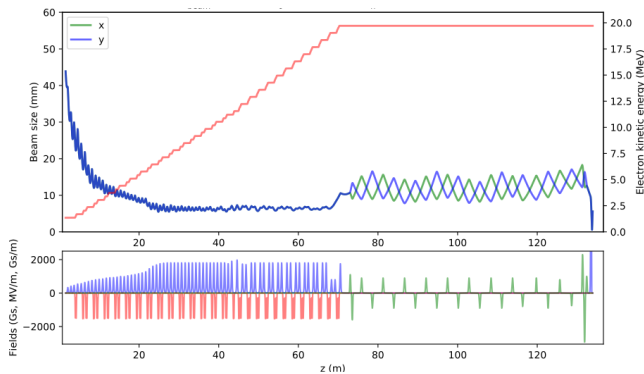


Рисунок 5 — Результаты расчета динамики модельного пучка в коде KENV. Верхний рисунок: рассчитанная огибающая пучка (синяя и зеленая линии) и энергия электронов (красная линия) вдоль ускорителя и транспортного FODO канала. Нижний рисунок: распределения ускоряющего электрического поля (красная линия), фокусирующего магнитного поля аксиальных линз в ускорителе (синяя линия) и градиента квадрупольных линз в транспортном канале (зеленая линия)

рисунка 5 видны две основные области движения - в первой происходит ускорение в регулярной ускоряющей аксиально-симметричной структуре, а во второй - транспортировка в FODO структуре. При расчете огибающей, код KENV, в силу применяемой модели, не учитывает изменение эмиттанса

пучка вдоль ускорителя, а также нелинейности распределения плотности заряда в пучке и aberrации фокусирующих линз, которые вносят поправки в эффективную силу каждой линзы. Таким образом, эти ошибки при определенных условиях могут приводить к сильному несоответствию модели огибающей пучка, рассчитанной в приближении К – В. Для расчета эмиттанса пучка, а также учета нелинейных поправок в расчете огибающей используется 2-D PIC код BEAM, в котором также используются начальные условия из UltraSAM и распределение магнитных полей ранее подобранное в KENV. На рисунке 6 приведено сравнение модельной огибающей для пучка с током 1 кА, рассчитанной в кодах KENV и BEAM. Видно хорошее соответствие между К-В огибающей и огибающей, рассчитанной в PIC коде; кроме того, на этом рисунке приведено значение средне-квадратичного нормализованного эмиттанса вдоль ускорителя, рассчитанного в программе BEAM. В начале ускорителя видны сильные колебания эмиттанса, связанные с неоптимальным согласованием фазового портрета и поперечного профиля пучка из инжектора с линейным фокусирующим каналом ускорителя. Известно, что в случае линейного фокусирующего канала ускорителя, оптимальное с точки зрения эмиттанса, состояние пучка характеризуется равномерным распределением заряда по радиусу и линейным фазовым портретом. В нашем случае оба этих условия нарушены, что очевидным образом должно выражаться в колебаниях поперечного распределения заряда пучка около равномерного профиля вдоль оси ускорителя.

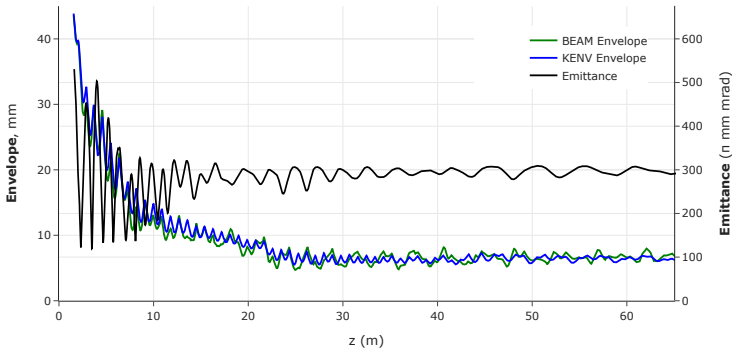


Рисунок 6 — Эмиттанс пучка (черная линия) и огибающая пучка, рассчитанная в коде BEAM, (зеленая линия) в сравнении с К – В огибающей (синяя линия) в зависимости от продольной координаты

Для описания данного эффекта была рассмотрена неоднородная плотность заряда пучка, которая была задана следующей формулой:

$$\rho(r, z) = \rho_1(z) + \rho_2(z)r^2. \quad (1)$$

Далее было найдено выражение для силы, действующей на электрон в радиальном направлении, с учетом квадратичной нелинейности плотности заряда ρ_2 :

$$F_r = (1 - \beta_z^2) \left[\left(\frac{\kappa}{2\pi\epsilon_0 r_b^2} - \frac{\rho_2(z)r_b^2}{4\epsilon_0} \right) r + \frac{\rho_2(z)}{4\epsilon_0} r^3 \right]. \quad (2)$$

Из полученного выражения следует, что при выполнении условия $\rho_2 = \frac{\partial \rho(r,z)}{\partial r^2} < 0$, которое соответствует понижению плотности заряда при приближении к границе сечения пучка, радиальная сила несколько меньше чем для однородного пучка. Если, наоборот, $\rho_2 = \frac{\partial \rho(r,z)}{\partial r^2} > 0$, то будет наблюдаться избыток дефокусирующей силы на краю пучка. Величина полной радиальной силы (2) на краю пучка не зависит от знака и величины ρ_2 , это означает, что распределение плотности тока и плотности заряда очень слабо влияет на ход огибающей. Это объясняет хорошее соответствие между огибающими, рассчитанными в модели пучка К – В и PIC коде BEAM.

Для получения пучка с минимальным эмиттансом нужно стремиться создавать такие оптические системы пушек, которые обеспечивают по возможности наилучшую однородность плотности пучка по сечению во время его ускорения и транспортировки. Для линейного фокусирующего канала это состояние характеризуется равномерным распределением заряда по радиусу и линейным фазовым портретом. Проведенные численные расчеты показали, что необходимые начальные условия пучка могут быть получены путем изменения геометрии прикатодного электрода пушки.

На рисунке 7 приведено сравнение результатов моделирования эволюции эмиттанса пучка, выполненное в программе BEAM для существующей оптики пушки (черная кривая) и для модифицированной оптики (красная кривая).

Также, на рисунке 7 приведены профили плотности тока и фазовые портреты пучка на расстоянии 45 метров от катода (вертикальная зеленая линия) для существующей оптики пушки (А) и для оптимизированной оптики пушки (В).

Из результатов моделирования, представленных на рисунке 7, видно, что отсутствие сильных колебаний профиля плотности пучка в начале ускорителя не приводит к релаксации этих зарядовых колебаний и росту эмиттанса. Таким образом, оценка снизу для эмиттанса в конце ускорителя составляет примерно 80 п-мм-мрад, что сравнимо с величиной теплового эмиттанса пучка.

В третьей главе представлены результаты экспериментов по транспортировке пучка и измерению его различных параметров.

В подпараграфе 3.1 описан эксперимент по восстановлению параметров пучка на выходе из электронной пушки. Для восстановления был использован код KENV и генетический алгоритм. Для реализации генетиче-

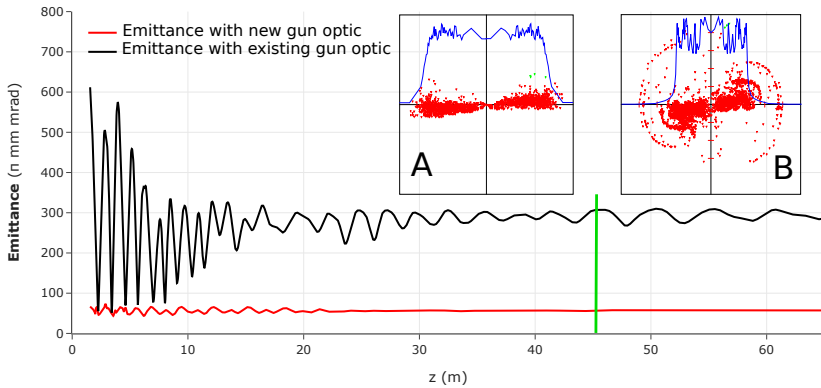


Рисунок 7 — Поведение эмиттанса пучка в ускорителе для существующей оптики пушки (черная кривая) и для модифицированной оптики пушки (красная кривая). Фазовые портреты пучка на расстоянии 45 метров от катода (вертикальная зеленая линия) для существующей оптики пушки (B) и для оптимизированной оптики пушки (A)

ского алгоритма была использована библиотека DEAP. В данном эксперименте регистрировалось изменение размера пучка электронов на люминофоре в конце ускорителя, как функции силы квадрупольной линзы, находящейся перед люминофором. При этом целевая функция генетического алгоритма представляла собой квадратный корень из среднеквадратичного отклонения от измеренных данных размера пучка (от силы квадрупольной линзы) результатов моделирования. Задача генетического алгоритма была в минимизации суммы целевой функции. Восстановленные начальные условия были использованы при моделировании огибающей пучка, при этом было достигнуто полное токопрохождение по ускорительному тракту. Кроме того, благодаря измеренным начальным условиям была выяснена неточность в угле наклона прикатодного электрода в модели пушки, используемой программой UltraSAM для расчета параметров пучка на выходе из пушки. Угол наклона в модели и в чертеже пушки отличался на несколько градусов. Данная неточность приводила к значительной ошибке модельного размера пучка на выходе из пушки и соответственно к некорректному расчету огибающей пучка в ускорителе и транспортных каналах.

В подпараграфе 3.2 описаны результаты эксперимента по инжекции пучка в опытный боковой канал разводки пучка. Как отмечалось выше, важной задачей является создание нескольких каналов разводки пучка, которые могут быть использованы для различных прикладных задач. Для исследования поведения пучка в такого рода системах был создан опытный образец бокового канала, который представляет собой параллельный перенос пучка по горизонтали. После верификации численной модели пучка в линейном ускорителе и устранения потерь были проведены эксперименты

по инъекции и транспортировке пучка в боковом транспортном канале. Для оценки качества пучка в конце бокового канала пучок фокусировался на тонкую измерительную танталовую пластину, установленную непосредственно после линзы финального фокуса в конце канала. При этом выполнялся контроль размеров пучка на пластине методом регистрации тормозного излучения.

Настройка электронно-оптической схемы существующего транспортного канала проводилась с помощью системы диагностики пучка, которая включала в себя датчики положения пучка, вместе с тем, исследование поперечной динамики фокусного пятна на измерительной танталовой пластине осуществлялось с помощью системы регистрации тормозного излучения. Пучок направлялся по каналу транспортировки в измерительную камеру. Финальная фокусирующая линза сжимала пучок на пластине из тантала. За измерительной камерой по ходу пучка устанавливалась диагностика, позволяющая наблюдать эволюцию фокусного пятна на пластине в течение импульса ЛИУ с временным разрешением 20 нс. Результаты экспериментов по сжатию пучка на измерительных пластинах в прямом и боковом каналах показали, что размер пятна в смысле полуширины на полувысоте не превышает 2 мм.

В подпараграфе 3.3 описан эксперимент по транспортировке и фокусировке пучка в ускорительном комплексе ЛИУ с энергией до 15 МэВ. В этом комплексе пучок электронов генерировался в инжекторе и инжектировался в линейный ускоритель. Фокусировка пучка в тракте линейного ускорителя осуществлялась 69 импульсными магнитными аксиально-симметричными линзами. После процесса ускорения пучок инжектировался в транспортный канал с квадрупольной фокусировкой. В конце транспортного канала располагался триплет квадрупольных линз и линза финального фокуса. Эксперименты по проводке пучка на ускорителе с энергией до 5 МэВ позволили создать численную модель огибающей пучка, которая обеспечила транспортировку пучка без потерь с сохранением качества и последующей его фокусировкой до размера меньше 2 мм.

В подпараграфе 3.4 описана коррекция орбиты пучка в ЛИУ методом матриц отклика пучка на дипольные корректоры. Экспериментально было показано, что без коррекции положения центра масс пучка не удастся транспортировать пучок в тракте линейного ускорителя и транспортном квадрупольном канале без потерь. Основным фактором, влияющим на смещение центра масс пучка вдоль ускорителя, является дипольное поле, которое появляется в том случае, когда фокусирующий элемент (соленоид или квадруполь) смещен по отношению к оси движения пучка. Для коррекции положения центра масс пучка в ускорительном комплексе ЛИУ используются рамочные двухкоординатные корректоры. Сложность коррекции в системе с аксиально-симметричным магнитным полем заключается в сильной связи между поперечными степенями свободы движения

пучка. По этой причине для коррекции центра-масс пучка был применен метод матриц отклика пучка на дипольные корректоры.

На рисунке 8 продемонстрирован результат коррекции положения центра масс пучка в датчиках положения пучка. Видно, что после коррекции отклонение центра масс заметно уменьшается.

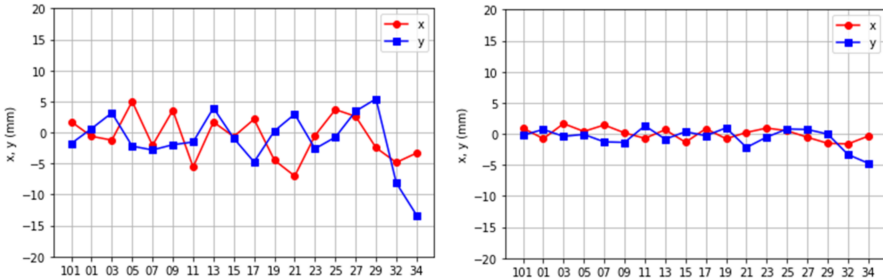


Рисунок 8 — Положения центра масс пучка в ДПП до коррекции (картинка слева) и после коррекции (картинка справа)

В подпараграфе 3.5 описан эксперимент по инъекции пучка из ЛИУ в систему компрессии ЛСЭ. Для проведения экспериментов по генерации суб-ТГц/ТГц излучения требуется обеспечить значительную компрессию пучка по поперечному сечению от исходного диаметра на выходе ускорителя, указанного выше, до требуемого диаметра 3 - 5 мм, а затем его устойчивую транспортировку в магнитной системе ЛСЭ на расстояние примерно 1 м. Исходя из существующей электронно-оптической структуры «ЛИУ», для осуществления компрессии и ввода пучка в ондуляторную секцию была предложена схема на основе двух импульсных магнитных соленоидов, одним из которых является фокусирующая линза «ЛИУ», а вторым - соленоид, используемый для транспортировки пучка в вакуумном канале ЛСЭ. На рисунке 9 представлена схема эксперимента по инъекции и транспортировке пучка из линейного ускорителя в систему компрессии, обеспечивающую магнитное сжатие пучка до размеров, необходимых для транспортировки в канале ЛСЭ, а также пример моделирования компрессии пучка в программе WARP.

Система компрессии включает в себя прототип вакуумной камеры ондулятора (6) и импульсный соленоид (7). Вакуумная камера (6), размещенная внутри импульсного соленоида, имеет два конических перехода с диаметра 150 мм стандартной камеры ускорительного тракта ЛИУ до диаметра 20 мм в области сжатия пучка протяженностью 600 мм. В этой области импульсный соленоид (7) длиной 650 мм и внутренним диаметром 200 мм создает квазиоднородное магнитное поле с амплитудой до 0.4 Тл. Настройка положения соленоида по углам и поперечным координатам осу-

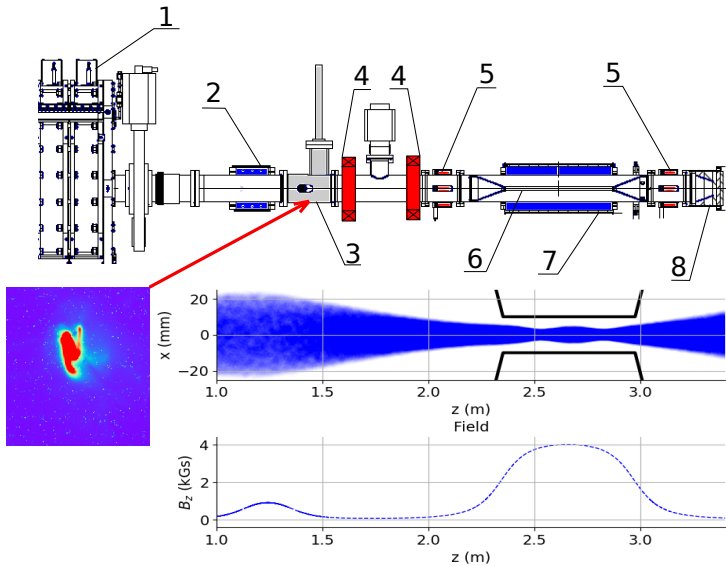


Рисунок 9 — Сверху представлена схема эксперимента по компрессии пучка, включающая в себя следующие элементы: 1 - 30-й ускоряющий модуль, 2 - согласующая импульсная магнитная линза, 3 - датчик переходного излучения, 4 - дипольные корректоры, 5 - датчики положения пучка, 6 - вакуумная камера ондулятора, 7 - длинный импульсный соленоид, 8 - могильник пучка. В нижней части приведена огibaющая пучка в системе компрессии, рассчитанная в программе WARP, и изображение пучка на датчике переходного излучения на входе в систему компрессии

пеществлялась с помощью специальных подвижных вставок, изготовленных из капролона. Согласование размера пучка на входе в область компрессии производилось с помощью импульсной линзы (2), которая при соответствующем выборе величины поля в ней обеспечивала минимальную амплитуду пульсаций радиуса пучка в вакуумной камере ондулятора. Для коррекции углов влета и поперечных координат пучка перед областью компрессии были использованы два рамочных дипольных корректора (4). Размер пучка после прохождения им импульсной линзы (2) измерялся в эксперименте с помощью датчика переходного излучения. Регистрация положений пучка до и после системы компрессии производилась с помощью калиброванных датчиков положения пучка.

Эксперимент показал, что через вакуумную камеру ондулятора проходит приблизительно половина импульса пучка по длительности и 90% амплитуды по току. Укорочение импульса тока пучка связано с нежелательным следствием наличия энергетического разброса вдоль пучка - "што-

порное движение пучка”. Этот эффект выражается в колебаниях центра заряда пучка (позиционный разброс), амплитуда которых обусловлена, с одной стороны, смещениями центраида пучка относительно осей магнитных фокусирующих линз, а с другой – величиной энергетического разброса электронов вдоль пучка. Для уменьшения энергетического разброса электронов вдоль пучка в процессе экспериментов по проводке пучка в ЛИУ была отработана специальная процедура, которая заключалась в подборе временных задержек начала импульсов напряжения ускорительных модулей в соответствии с временем пролета пучка через каждый модуль. Это время для конкретного модуля измерялось с помощью ближайшего датчика положения пучка, и по его значению производилась настройка задержки импульса ускоряющего напряжения модуля.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Проанализированы факторы прироста эмиттанса пучка в различных частях ускорительного комплекса ЛИУ;
2. С помощью численных расчетов и аналитического метода теории возмущений исследована динамика сильноточного пучка в инжекторе;
3. На основе результатов исследований был предложен подход к модификации оптики пушки, обеспечивающий равномерное пространственное распределение частиц пучка. Это распределение является необходимым условием для стационарного состояния пучка в процессе его ускорения в ЛИУ;
4. На основе модели пучка Капчинского – Владимирского проведена оптимизация электронно-оптической системы индукционного ускорителя для различных значений энергии и тока пучка. Данная оптимизация позволила обеспечить транспортировку пучка без потери тока и с сохранением эмиттанса, необходимого для достижения размера фокусного пятна на измерительной пластине не более 2.0 мм;
5. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность отклонения и транспортировки пучка с током выше 1 кА на угол 24 градуса в транспортном канале сложной геометрии ускорителя ЛИУ с последующей его фокусировкой до размера 1.5 мм;
6. С помощью оптимизированной электронно-оптической системы ускорителя экспериментально продемонстрирована возможность магнитной компрессии пучка с диаметра 4 см до диаметра 10 мм и последующей транспортировки сжатого пучка на длину 0.65 м, что является необходимым условием для реализации схемы ЛСЭ на базе пучка из ЛИУ;

7. Реализована коррекция орбиты пучка во всем ускорительном комплексе методом матриц отклика.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Эволюция эмиттанса пучка в линейном индукционном ускорителе с дискретной фокусирующей системой / Д. А. Никифоров, А. В. Иванов, С. Л. Синицкий [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 4. – С. 31–44. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-4-31-44> (дата обращения: 30.05.2023).

2. Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source / D. A. Nikiforov, A. V. Petrenko, S. L. Sinitsky [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2021. – Vol. 16, nr 11. – P. P11024. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/16/11/P11024>. – Дата публикации: 19.11.2021.

3. High-current electron-beam transport in the LIA-5 linear induction accelerator / D. A. Nikiforov, M. F. Blinov, V. V. Fedorov [et al.]. – Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2020. – Vol. 17, nr 2. – P. 197–203. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477120020156>. – Дата публикации: 08.04.2020.

В сборниках тезисов докладов научных конференций:

1. Исследование динамики сильноточного РЭП, генерируемого в ЛИУ, для применения в качестве драйвера в терагерцовом ЛСЭ / Д. А. Никифоров, С. Л. Синицкий, Е. С. Сандалов [и др.]. – Текст : электронный // Тезисы докладов XII Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 28 февраля – 4 марта 2022 года). – Нижний Новгород, 2022. – С. 96–97. – URL: <https://clck.ru/33mebn> (дата обращения: 09.06.2022).

2. Studies on Electron Beam Transport in a Linear Induction Accelerator for Free Electron Laser Application / E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, D. I. Skovorodin [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) (Lake Tahoe, NV, 12–16 September 2021). – New York : IEEE, 2021. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9588436>. – Дата публикации: 08.11.2021.

3. Theoretical and Experimental Studies on Compression and Transport of an Intense Electron Beam in the Channel of sub-mm FEL / E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, D. A. Nikiforov [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (Chengdu, China, 29 August – 3 September 2021). – New York : IEEE, 2021. – P. 518–519. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9567073>. – Дата публикации: 20.10.2021.

4. Моделирование и исследование динамики пучка в мощном линейном индукционном ускорителе ЛИУ-20 / Д. А. Никифоров, А. В. Петренко, Г. И. Кузнецов [и др.]. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов научно-технической конференции «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений» (Снежинск, 15–18 июня 2021 года). – Снежинск : РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. – С. 26–27.

Никифоров Данила Алексеевич

**Исследование динамики пучка электронов
в мощном линейном индукционном ускорителе
с фокусировкой на сосредоточенных элементах**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 30.06.2023.

Подписано в печать 04.07.2023.

Формат 60×90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 6

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11