

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Ключевская Юлия Денисовна

**ДИНАМИКА ПУЧКОВ С ВЫСОКОЙ ЯРКОСТЬЮ В ЛИНЕЙНЫХ
УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ
ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва-2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: **Полозов Сергей Маркович**, доктор физико-математических наук, доцент, «НИЯУ «МИФИ».

Официальные оппоненты:

Павлов Юрий Сергеевич Российская академия наук, заведующий лабораторией радиационных технологий
доктор технических наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина

Тютюников Сергей Иванович Объединенный институт ядерных исследований, Начальник отделения № 5
доктор технических наук Научно-методических исследований и инноваций Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина
Ермаков Андрей Николаевич Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института ядерной физики
кандидат физико-математических наук

Защита состоится «06» октября 2021 года в 15 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.01.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «НИЯУ «МИФИ» по адресу: 115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., д. 31,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «НИЯУ «МИФИ»

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
МИФИ.01.05, кандидат технических наук, доцент

 М.В. Лалаян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Многие медицинские установки разработаны на основе компактных линейных ускорителей электронов. Традиционный 3 ГГц диапазон частот широко используется ведущими производителями в ускоряющих структурах на бегущей и стоячей волне, использующихся в установках для 2D, 3D, конформной лучевой терапии. Интраоперационная лучевая терапия и системы типа «кибер-нож» [*1] требуют использования более компактных ускорителей и инженерных систем. Компактность ускоряющей структуры может быть достигнута за счет увеличения частоты ускоряющего поля (частотные диапазоны 6, 10 ГГц, возможно также 17 и 30 ГГц). Кроме того, эти ускоряющие структуры требуют меньшей мощности ВЧ питания. Эффективные медицинские ускорители, работающие в 5 и 10 см-диапазонах, хорошо известны [*2]. В работе рассмотрена структура с рабочей частотой 27 ГГц, в частности рассмотрена динамика частиц высокой яркости, $B=10^9$ А/(м²рад²). Важной задачей при разработке и создании ускоряющих структур ЛУЭ является их термостабилизация. В противном случае могут происходить существенные изменения геометрических размеров и, как следствие, уход резонансной частоты секции.

Для компактных рентгеновских лазеров на свободных электронах (Compact XFEL) важно проводить оценку численного моделирования динамики пучка высокой яркости. Было проведено измерение эмиттанса фемтосекундного пучка высокой яркости методом квадрупольного сканирования. Также проведена оценка влияния нагрузки током на динамику пучка для фотоинжектора LUCX.

В настоящий момент в CERN принято решение о дальнейшей проработке проекта будущего циклического коллайдера (Future Circular Collider, FCC) [*3]. Цель FCC состоит в том, чтобы значительно увеличить значения энергии и интенсивности частиц 100 ТэВ и лептонам 350 ГэВ в поисках новых исследований физических процессов. Проект

CERN FCC представляет собой международную коллаборацию более чем 70 институтов со всего мира, одним из которых является НИЯУ МИФИ. На разных этапах проекта планируется запуск нескольких режимов работы коллайдера, а именно в лептонной моде со столкновениями $e^- \leftrightarrow e^+$ при энергии до 2×175 ГэВ в системе центра масс и в адронной моде с энергиями до 2×50 ТэВ, а также в режиме лептон-адронных столкновений. Для проектируемого линейного ускорителя-инжектора CERN FCC-ее был предложен фотоинжектор.

В настоящее время в России в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы идет разработка нескольких новых источников синхротронного излучения. Проект «Специализированный источник синхротронного излучения 4го поколения (ИССИ-4, новое название «СИЛА»: «Синхротрон+Линак») реализуется в НИЦ «Курчатовский институт». Проект предусматривает создание накопительного синхротрона и лазер на свободных электронах. Для данного проекта также был разработан фотоинжектор.

Цели работы

Целями данной работы являлись разработка компактной ускоряющей системы линейного ускорителя электронов 30 ГГц диапазона для комплекса лучевой терапии, оптимизация фотопушек для новых инжекторов комплекса Future Circular Collider и источника синхротронного излучения ИССИ-4 (СИЛА) НИЦ «Курчатовский институт», разработка систем термостабилизации ускоряющих структур.

Научная новизна

1. Разработаны два варианта ускоряющей структуры для компактного ускорителя электронов с высокой яркостью пучка с рабочей частотой 27 ГГц, предназначенного для использования в составе медицинского терапевтического комплекса, для данных структур разработаны и оптимизированы электродинамические модели.

2. Разработаны и оптимизированы системы термостабилизации для

ускорителей с рабочими частотами 3 и 27 ГГц, системы на основе двойных коаксиальных кожухов внедрены в НПП «Корад» для серии линейных ускорителей электронов технологического назначения.

3. Для фотоинжектора LUCX (КЕК, Япония) в ходе проведения прецизионного измерения поперечного эмиттенса проведено исследование динамики электронного пучка высокой яркости и пикосекундной длительности в ускоряющей структуре с учетом пространственного заряда пучка и эффекта нагрузки током, результаты моделирования совпали с экспериментальными данными.

4. Проведено исследование динамики электронного пучка высокой яркости и пикосекундной длительности в ускоряющей структуре с учетом пространственного заряда пучка и эффекта нагрузки током при пониженной напряженности поля для разрабатываемого фотоинжектора FCC CERN.

5. Проведено исследование динамики электронных сгустков высокой яркости в линейном ускорителе-инжекторе на энергию 6 ГэВ для источника синхротронного излучения ИССИ-4 (СИЛА).

Практическая значимость

1. На основе полученных результатов предложен вариант компактного ускорителя электронов с высокой яркостью пучка для прикладных целей в области медицины. Проведено моделирование динамики пучка и исследование электродинамических характеристик ускоряющих структур. Предложен вариант призматической ускоряющей структуры с рабочей частотой 27 ГГц, размеры которой могут позволить значительно уменьшить существующие в настоящее время медицинские комплексы.

2. Для структуры на частоте 27 ГГц разработана система термостабилизации, позволяющая ограничить максимальную температуру внутри структуры до 34°C, в этом случае сдвиг частоты является незначительным. Также была разработана система термостабилизации для технологического ЛУЭ 3 ГГц диапазона с энергией 2 МэВ. С помощью численного моделирования показано, что при рабочем уровне мощности

около 2,0 МВт в самом горячем месте структуры (на носиках диафрагмы) температура повышается с 25 до 55° С. При этом возникает сдвиг частоты 1,5 МГц, который необходимо учесть и скорректировать при разработке структуры. Для ЛУЭ с энергией 10 МэВ нагрев происходит с 25 до 55°С и приводит к сдвигу частоты 1,2 МГц. Запущено шесть ускорителей данной серии, в которых использована разработанная система термостабилизации на основе двойного коаксиального кожуха.

3. Для фотоинжектора компактного источника рентгеновского излучения LUCX (КЕК, Япония) проведено численное моделирование динамики пучка. Для оценки качества пучка и проверки моделей выполнено сравнение результатов моделирования с результатами измерения поперечного эмиттанта вдоль канала ускорителя, показавшее отличное совпадение. Проведена оценка влияния нагрузки током и определен предельный заряд в сгустке до 600 пКл на сгусток, при котором нагрузка током не оказывает влияния на параметры ускоренного пучка.

4. Предложен вариант нового фотоинжектора для проекта лептонной версии – развития Большого адронного коллайдера.

5. Предложен вариант нового фотоинжектора для проекта инжектора при полной энергии 6 ГэВ для источника синхротронного излучения четвертого поколения ИССИ-4 (СИЛА).

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанные бипериодические ускоряющие структуры (аксиально-симметричная и призматическая) с рабочей частотой 27 ГГц, рассчитанные на энергию 6 МэВ, результаты оптимизации их электродинамических моделей.

2. Результаты численного моделирования динамики пучка электронов с высокой яркостью 10^9 А/(м²рад²) в ускоряющих структурах на частоте 27 ГГц, рассчитанных на энергию пучка 6 МэВ.

3. Разработанные конструкции систем термостабилизации и результаты исследования тепловых процессов в структурах с рабочей частотой 3 и 27 ГГц. Конструкция в виде двойного коаксиального кожуха внедрена для

серии ускорителей с БУС на энергию 2 МэВ и со средней мощностью пучка около 2 кВт и на энергию 10 МэВ с мощностью пучка до 20 кВт. Полученные результаты и предложенные конструкции обеспечили надежную эксплуатацию ускорителей со значительной интенсивностью и высокой яркостью пучка.

4. Результаты проведенного в ходе прецизионного измерения поперечного эмиттанса в фотоинжекторе LUCX (КЕК, Япония) исследования динамики электронного пучка высокой яркости $4 \cdot 10^{14} \text{ A}/(\text{м}^2 \text{ рад}^2)$, результаты моделирования совпали с экспериментальными данными.

5. Результаты численного моделирования динамики электронных пучков высокой яркости с учетом влияния поля пространственного заряда и эффекта нагрузки током пучка в фотоинжекторе FCC CERN, учтенные при оптимизации его конструкции.

6. Результаты численного моделирования динамики электронных сгустков высокой яркости в линейном ускорителе на полную энергию 6 ГэВ для проекта ИССИ-4 (СИЛА), использованные при разработке элементов ускорителя.

Апробация результатов

Результаты диссертации докладывались на научных конференциях: 20-й Международный симпозиум по оптимизации динамики пучка (Санкт-Петербург, 2014); Международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC'14, (Дрезден, Германия, 2014); Международная конференция по линейным ускорителям заряженных частиц LINAC'14 (Женева, Швейцария, 2014); Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC'14, (Санкт-Петербург, 2014); XIX Международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2015) к 100-летию Ф.Л. Шапино, (Дубна, 2015); X Международный симпозиум «Излучение релятивистских электронов в периодических структурах» (Санкт-Петербург, 2015); Международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC'14, (Дрезден,

Германия, 2014); Научная конференция молодых специалистов и ученых, проводимая мероприятий посвященных 55-летию ФГУП «НПП «Торий», 2014; Международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC'16, (Бусан, Корея, 2016); Международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC'17, (Копенгаген, Дания, 2017); «Научная сессия НИЯУ МИФИ», Москва, 2013-2017; . Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2018»; Диплом об участии в Конкурсе «Лучший аспирант», 2014.

Достоверность результатов

Достоверность научных результатов обоснована применением современных и общепризнанных методов и программ для анализа динамики пучка и электродинамических характеристик ускоряющих структур. Также достоверность результатов была подтверждена верификацией с экспериментальными данными, полученными при запуске и эксплуатации ускорителей на энергию 2, 8 и 10 МэВ, разработанных в НИЯУ МИФИ совместно с НПП «Корад». Результаты эксперимента по измерению эмиттанса на ускорителе LUCX хорошо согласуются с результатами моделирования динамики пучка.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертации получены и разработаны автором лично. Автором была исследована динамика пучка в ускорителе на 6 МэВ с рабочей частотой 27 ГГц и в фотопушках LUCX, фотоинжекторов CERN FCC-ee и ИССИ-4, разработаны электродинамические и термодинамические модели всех рассмотренных в диссертации ускоряющих структур.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных работах, из них – 12 в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus, 1 - в рецензируемом издании, включенном в перечень, сформированный Минобрнауки России, 4 – в изданиях, индексируемых РИНЦ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 131 страницу текста с 95 рисунками и 33 таблицами. Список литературы содержит 91 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели, научная новизна, практическая значимость и апробация работы, представлены основные положения, вносимые на защиту, описана структура и объем работы. Дан обзор современного состояния работ по компактным ускорителям электронов.

В первой главе рассматривается возможность создания компактного ускорителя электронов на энергию около 6 МэВ, предназначенного для использования в составе медицинского терапевтического комплекса и работающего на повышенной по сравнению с традиционными 3, 5 или 10 ГГц частоте. Выбранная рабочая частота 27 ГГц позволяет существенно уменьшить размеры по сравнению с используемыми в настоящее время структурами 10 и 5 см диапазонов.

В п.1.1 описан общий подход к оценке электродинамических характеристик. Разработанная ускоряющая структура представляется собой бипериодическую ускоряющую структуру (БУС) с внутренними ячейками связи. Секция линейного ускорителя включает два участка: адиабатический группирователь и регулярную ускоряющую часть. Представлены результаты исследования электродинамических характеристик бипериодической ускоряющей структуры, оценка вариационных кривых, допуски изготовления структуры, рассмотрены классическая аксиально-симметричная и призматическая ускоряющие структуры.

В п.1.2 приведены результаты моделирования и оптимизации ускоряющей структуры с рабочей частотой 27 ГГц, которые были проведены с помощью программы электродинамического моделирования

CST STUDIO SUITE. Целью оптимизации является нахождение геометрии, обеспечивающей получение рабочей частоты 27 ГГц и высокого шунтового сопротивления. Для структуры на частоте 27 ГГц были получены значения погонного шунтового сопротивления 130 МОм/м и добротности 4080. Для сравнения, структура с рабочей частотой 3 ГГц имеет значения эффективного шунтового сопротивления около 80 МОм/м и добротность выше 15000.

В п.1.3 представлен анализ дисперсионных характеристик для различных резонансных моделей. Была произведена точная настройка модели на рабочую частоту 27 ГГц путем варьирования размеров радиуса основных ускоряющих ячеек и ячеек связи.

В п.1.4 проведено моделирование структуры с вводом мощности. С помощью оптимизации радиуса ячейки ТТВ происходила настройка на резонансную частоту. В исследуемой модели также отдельно настраивалась концевая ячейка и подводящий волновод. Ввод мощности (см. рис. 1) был организован посредством стандартного прямоугольного волновода сечением с внутренними размерами 8,6х4,3 мм, который соответствует диапазону частот 22,0-33,0 ГГц. С помощью оптимизации было произведено согласование ввода мощности со структурой путем варьирования длины ввода мощности и размера диафрагмы, после чего было получено значение коэффициента отражения $S_{11} = -53$ дБ.

В п.1.5 приведены расчеты вариационных характеристик БУС. Для оценки технологических требований к ускоряющей структуре, прежде всего – технологических допусков – необходимо определить вариационные характеристики ускоряющей структуры. Были исследованы зависимости частоты от основных геометрических параметров ячейки (радиуса ускоряющей ячейки, радиуса скругления обечайки ускоряющей ячейки, радиуса ячейки связи и радиуса скругления носика). Наиболее существенное влияние на резонансную частоту оказывают радиус ускоряющей ячейки и радиус скругления носика полутрубки. В таблице 1 представлено сравнение вариационных характеристик БУС для 27 ГГц и

3 ГГц.

В п.1.6 рассмотрены требования к допускам на изготовление структуры. Для ускорителя с рабочей частотой 27 ГГц допуски на радиусы ускоряющих ячеек и ячеек связи составляют 0,005 мм. Особое внимание при изготовлении ячеек необходимо обратить на соблюдение требований к размерам и форме носика (радиус апертуры, высота носика, радиус скругления носика, угол α наклона носика). В этой области сосредоточено электрическое поле максимальной напряженности, и отклонения за пределы значений полей допуска приводят к существенному уходу рабочей частоты.

Таблица 1. Сравнение вариационных характеристик БУС для 27 ГГц и 3 ГГц

Параметр	$\Delta F/dR$ [МГц/мм] для 27 ГГц	$\Delta F/dR$ [МГц/мм] для 3 ГГц
Радиус ускоряющей ячейки	108	35,5
Радиус скругления обечайки ускоряющей ячейки	60	19,6
Радиус ячейки связи	113	21,2
Радиус скругления носика	180	15,8

В п.1.7 в связи с тем, что аксиально-симметричную бипериодическую ускоряющую структуру с рабочей частотой 27 ГГц с необходимой точностью изготовить можно только электроэрозионным способом, который не позволяет без специальной оснастки обрабатывать аксиально-симметричные структуры, в качестве альтернативы был рассмотрен другой вариант БУС – призматическая ускоряющая структура. Общий вид БУС и ПБУС показан рисунке 1. С помощью оптимизации параметров ускоряющей ячейки и ячейки связи получены оптимальные размеры призматической структуры, необходимые для возбуждения вида колебаний $\pi/2$ на частоте 27 ГГц и выравнивания распределения амплитуды поля в ускоряющих ячейках. Полученные в результате оптимизации электродинамические характеристики приведены в таблице 2. Для сравнения представлены значения и для аксиально-симметричной БУС. Видно, что электродинамические характеристики

призматической ускоряющей структуры значительно выше, чем у аксиально-симметричной ($R_{ш}=170$, $Q=4690$).

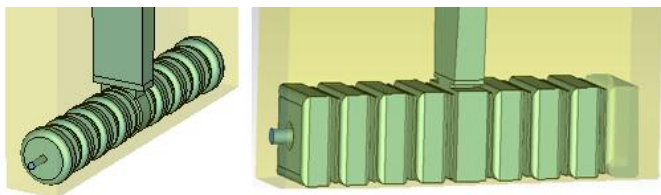


Рисунок 1 – Общий вид БУС и ПБУС

Таблица 2. Основные электродинамические характеристики ПБУС и БУС

Параметры	Значения	
	ПБУС	БУС
Рабочая мода	$\pi/2$	$\pi/2$
Поперечный размер/диаметр ускоряющих ячеек, R_{cell} , мм	7,7	7,6
Поперечный размер/диаметр ячейки связи, R_{bound} , мм	7,7	7,4
Радиус скругления обечайки, R_{lc} , мм	1,0	1,0
Частота, ГГц	27,0	27,0
Погонное шунтовое сопротивление, МОм/м	170	130
Коэффициент связи	0,09	0,09
Добротность	4690	4080

В п.1.8 представлены результаты численного моделирования динамики частиц для ускорителя с рабочей частотой 27 ГГц, приведены требования к параметрам пучка, сгенерированного электронной пушкой, являются: энергия 50 кэВ, ток в импульсе 8 мА при длительности импульса около 0,5 мс, диаметр пучка на входе ускоряющей структуры около 1 мм. Было предложено использовать и модернизировать известный источник электронов с оптикой типа «INDOR» от COREX [*4]. Напряжение на катоде выбрано равным 50 кВ, на сетке 1 кВ. Результаты компьютерного моделирования с помощью программы SUMA [*5-6]. На расстоянии 4,3 см от катода электронный пучок имеет диаметр 0,95 мм, ток 10 мА и поперечный эмиттанс, равный 2,47 мм·мрад, первеанс равен 0,1мкА/В^{3/2}. Моделирование динамики пучка в БУС проводилось с использованием программы BEAMDULAC-BL, которая была разработана на кафедре

Электрофизических установок НИЯУ МИФИ [*7]. Структура разделена на два участка: группирующий и основной ускоряющий. Сначала было исследовано поведение пучка в группирователе, где осуществляется формирования непрерывного потока электронов в стустки, а затем проводился расчет параметров для основной секции. В результате моделирования динамики пучка было показано, что пучок электронов может быть эффективно сгруппирован и ускорен до энергии 5-6 МэВ. Коэффициент токопрохождения для всей структуры равен 72%. На рисунке 2 изображена огибающая пучка, ее размер для основной секции ускорителя меньше 1 мм, что удовлетворяет требованию согласования пучка с каналом. Также на рисунке 2 изображен фазовый портрет пучка, где видно, что среднее значение энергии равно 4,8 МэВ, а предельная энергия достигла 6 МэВ. Оптимальные значения параметров электронной пушки, группирователя и основной части и результаты численного моделирования динамики пучка приведены в таблице 3.

Моделирование также показало, что кулоновское поле не оказывает практически никакого влияния на динамику, приводя только к незначительному (до 0,5 мм) росту огибающей пучка в ячейках группирователя.

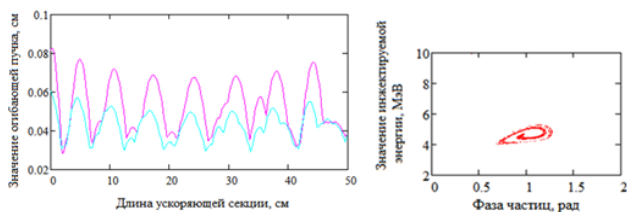


Рисунок 2 – Огибающая пучка и фазовый портрет частиц

Вторая глава посвящена тепловым процессам в ускоряющих структурах 3 и 30 ГГц диапазонов.

В п.2.1 рассматриваются тепловые процессы в линейном ускорителе электронов на энергию 10 МэВ и мощность пучка до 20 кВт, разработанного НИЯУ МИФИ и НПП Корад. Было рассмотрено три

варианта системы охлаждения: со сквозными цилиндрическими каналами в обечайке структуры, с коаксиальным кожухом, а также конструкция с трубками и кожухом.

Таблица 3. Оптимальные значения параметров группирователя и основной части и результаты численного моделирования динамики пучка

Параметры	Электронная пушка	Группирователь	Основная часть
Максимальная напряженность ВЧ поля, кВ/см	300	300	410
Длина, см	-	25	50
Энергия инъекции, МэВ	0,561	0,05	1,94
Ток инъекции, мА	0,01	10,0	8,0
Энергия на выходе, МэВ	-	1,94	5,0
Коэффициент токопрохождения, %	-	83,2	86,5
Поперечные потери частиц, %	-	0	0
Продольные потери частиц, %	-	15,5	13,2

Система охлаждения со сквозными цилиндрическими каналами в обечайке структуры представляет собой 16 одинаковых, равноудаленных друг от друга и от центра структуры трубок ($d=10$ мм), которые заполнены водой. В соседних трубках поток воды направлен в противоположную сторону. За начальную температуру воды было взято значение $t=25^{\circ}\text{C}$. Расход воды варьировался от $G=500$ л/ч до 1500 л/ч. Результаты моделирования показывают, что увеличение расхода воды в структуре свыше $G=1000$ л/ч не оказывает серьезного влияния на тепловые деформации и сдвиг частоты.

Далее рассмотрена система охлаждения с двойным коаксиальным кожухом. Был также рассмотрен вариант, когда охлаждение осуществляется с помощью двойного коаксиального кожуха. Были выполнены расчеты для потоков охлаждающей жидкости, значения которых аналогичны потокам для структуры с трубками. Результаты моделирования показали, что система охлаждения с кожухом отличается большей стабильностью, чем система с трубками.

Также была рассмотрена комбинированная конструкция охлаждающей системы, состоящей из 16 трубок в обечайке структуры и одиночного кожуха с размерами, аналогичными использованным для двойного кожуха. Принято, что направление потока воды во всех трубках одинаково и противоположно направлению потока в кожухе. Системы охлаждения с двойным кожухом и трубками и одинарным кожухом дают практически идентичные результаты.

Для всех трех вариантов при рабочем уровне импульсной мощности около 4,5 МВт и скважности около 300 структура нагревается с 25 до примерно 55°C (максимум наблюдается на носиках диафрагм) при потоке охлаждающей воды около 1000 л/час. При этом деформация структуры составляет не более 20 мкм, что примерно равно точности изготовления ячеек. Сдвиг частоты составляет 1,2 МГц для регулярных ячеек и 1,4 МГц для первой ячейки группирователя при охлаждении с помощью трубок. Для двух других вариантов система охлаждения смещение составит 1,0 и 1,3 МГц. Система термостабилизации в итоге была выполнена в виде двойного кожуха снаружи структуры (см. рис. 3).

В п.2.2 рассмотрены тепловые процессы в ЛУЭ на энергию 2 МэВ и мощность пучка около 2 кВт, разработанном совместно НПП «Корад» и НИЯУ МИФИ. Ускоритель построен на основе БУС, работающей на частоте 3000 МГц. Систему охлаждения предлагается выполнить в виде двойного кожуха снаружи структуры, аналогично тому, как это было сделано ранее для ускорителя на 10 МэВ. За начальную температуру воды было взято значение $t=20^{\circ}\text{C}$. Расход воды варьировался от $G=500$ л/ч до 1500 л/ч.

Результаты показали, что увеличение потока воды более 1000-1200 л/ч не существенно влияет на температуру в самом теплом месте структуры – носике диафрагмы. При рабочем уровне мощности около 2,0 МВт структура нагревается с 25 до примерно 55° С (на носиках диафрагм) при $G=1000$ л/час. При этом деформация структуры составляет не более 20 мкм, а сдвиг частоты 1,5 МГц.

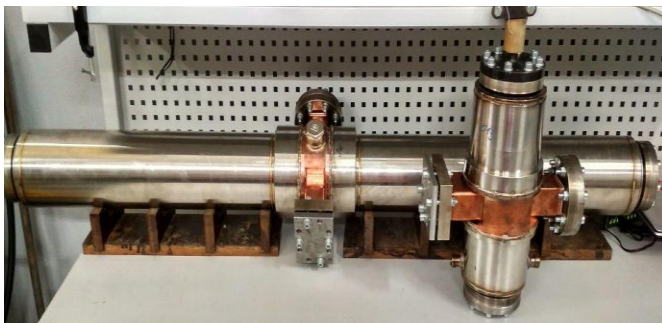


Рисунок 3 – Ускоритель электронов на энергию 10 МэВ и мощность пучка до 20 кВт, запущена серия из пяти экземпляров, и секция на 2 МэВ. Видна система охлаждения с двойным кожухом

Данные ускорители на энергии от 2 до 10 МэВ запущены в мелкосерийное производство, к концу 2019 г. в эксплуатацию запущено шесть установок. В ходе настройки ускорителей удалось регулировать значение рабочей частоты для поддержания ее в полосе усиления (генерации) клистрона (магнетрона) с помощью температуры и скорости протока охлаждающей жидкости.

В п.2.3 рассматривается система охлаждения БУС с рабочей частотой 27 ГГц. Для неё проводилась оценка влияния эффектов ВЧ нагрева на характеристики структуры для определения смещения частоты в зависимости от температуры охлаждающей жидкости. Была выбрана система охлаждения со сквозными цилиндрическими каналами в обечайке структуры. Показано, что при значении потока воды, равном 2000 л/ч для каждой охлаждающей трубки максимальный сдвиг частоты равен 30 МГц при температуре нагрева структуры 58° С.

В третьей главе приведены результаты измерения эмиттанса пучка высокой яркости и оценка влияния нагрузки током для ускорителя LUCX (Компактный Ондюляторный Лазерный источник рентгеновского излучения, КЕК, LUCX). LUCX – это компактный линейный ускоритель электронов, работающий в одно- или многосгустковом режиме за один высокочастотный импульс. Измерение эмиттанса проводилось с помощью

метода квадрупольного сканирования на выходе из ускоряющей секции с помощью квадрупольного магнита [*8]. Изменяя ток квадрупольного магнита и фиксируя размер электронного пучка, можно определить связь между размерами пучка. Благодаря этой связи рассчитывается поперечный нормализованный эмиттанс.

В п.3.1 описывается электродинамическая модель и приведены электродинамические характеристики 3,5-ячеечной ускоряющей структуры СВЧ-пушки LUCX.

В п.3.2 приведены результаты моделирования динамики пучка СВЧ-пушки LUCX. Анализ динамики пучка был проведен с помощью кода BEAMDULAC-BL-photogun [*9]. Программа позволяет проводить моделирование динамики пучка, учитывая эффект нагрузки током и квазистатические компоненты Кулоновского поля. Рисунок 4 демонстрирует главные результаты численного моделирования динамики электронного сгустка в ВЧ-пушке. Была проведена оценка влияния фазы инжекции на конечную энергию электронного пучка. Сравнительный анализ показал, что значения совпадают с экспериментальными данными. Общий коэффициент токопрохождения для всей структуры достигает 93,6%. Огибающую пучка можно достаточно эффективно контролировать магнитным полем.

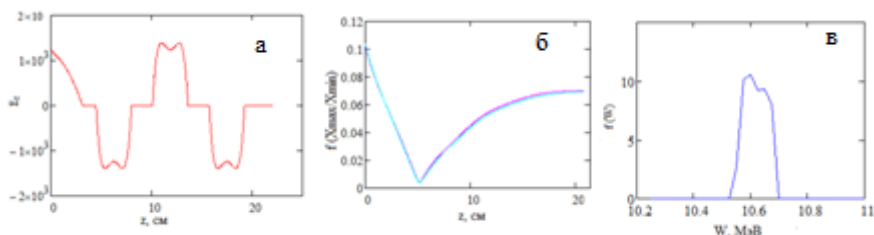


Рисунок 4 – Распределение амплитуды ВЧ-поля (а), огибающие пучка для обоих поперечных осей (б) и энергетический спектр (в), $E_{\max}=1,3$ кВ/см

В п.3.3 приведены результаты измерения поперечного эмиттанса на установке КЕК: LUCX методом квадрупольного-сканирования

фемтосекундного электронного пучка. Изменение размера поперечного пучка измеряется для разных значений тока в обмотках фокусирующего и дефокусирующего квадрупольей. (см. рис. 5). Характерный профиль пучка в зависимости от тока в обмотках также показан на рисунке 5.

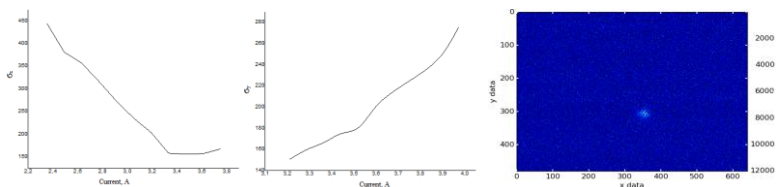


Рисунок 5 – Поперечное распределение электронного пучка на люминесцентном экране как функция тока в обмотке фокусирующего квадруполья, тока в обмотке дефокусирующего квадруполья был настроен на 3,05 А. Профиль электронного сгустка на люминесцентном экране, соответственно

Дальнейший анализ измеренных данных показывает совпадение с теоретическими расчетами: различие для максимально вероятной энергии составляет $5 \cdot 10^{-6} \%$, а для поперечного эмиттansa пучка рассчитанное значение составляют $\mathcal{E}_x = 4,7 \pi$ мм·мрад, $\mathcal{E}_y = 6,5 \pi$ мм·мрад, экспериментальное 4π мм·мрад в вертикальной плоскости и 5π мм·мрад в горизонтальной, соответственно.

Таким образом, результаты моделирования динамики пучка хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В п.3.4 проведена оценка влияния нагрузки током и собственного кулоновского поля на динамику. Основной целью моделирования являлось исследование влияния нагрузки током на распределение амплитуды ВЧ поля и динамику пучка в режиме «bunch-to-bunch», при котором сгусток нагружает ускоряющую структуру и следующие за ним сгустки в пачке должны получать меньший прирост энергии. Было показано, что сгусток с зарядом 1,5 пКл при длительности сгустка порядка 100 фс не оказывает существенного влияния на амплитуду ускоряющего поля. Максимальная просадка амплитуды наблюдается в середине ускоряющей ячейки, но составляет всего 1,7 %. Моделирование

также показало, что кулоновское поле не оказывает практически никакого влияния на динамику, приводя только к 30% росту огибающей пучка (до 0,15 мм) в ячейках фотопушки. Предельный ток 100 А.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования динамики пучка для нового линейного ускорителя-инжектора для Будущего Кольцевого Коллайдера CERN FCC-ee. Исследование проводилось с помощью программы BEAMDULAC-BL [*7]. Также проведен анализ динамики электронных сгустков в инжекторе при полной энергии для ИССИ-4.

В п.4.1 представлены результаты моделирования динамики пучка в версии фотопушки RF-gun-v2 для FCC-ee для сгустков с зарядами 1-6 нКл. Показано, что коэффициент захвата будет быстро снижаться при высоком значении заряда пучка, например, он не будет выше 60% для сгустков с зарядом 6 нКл. Из-за этого RF-gun-v2 будет иметь ограничение по току и не сможет эффективно использоваться в качестве ускоряющей структуры для сгустков с зарядом более 2 нКл. В ходе моделирования было обнаружено, что для пучков с большой интенсивностью спектр пучка и коэффициент захвата достаточно сильно зависят от нормального распределения фаз пучка.

В п.4.2 приведены результаты моделирования динамики пучка RF-gun-v3 с термокатодом. ВЧ-пушка RF-gun-v3 с термоэмиссионным катодом была предложена для ускорения пучков с зарядами порядка нКл в качестве альтернативы фотопушке. Результаты моделирования динамики пучка показали, что для такой пушки коэффициент захвата может быть увеличен до 90-95% для сгустков с зарядом 3 нКл и до 70-80% для 6 нКл.

В п.4.3 приведены результаты моделирования динамики пучка для новой версии фотопушки RF-gun-v4. Моделирование было проведено для сгустка с зарядом 6 нКл и длительностью 10 пс, начальный поперечный эмиттанс составляет 20 мм·мрад. Новая версия может обеспечивать более эффективный захват пучка по сравнению с версией RF-gun-v2, но потери

электронов порядка 15-20% являются все еще очень высокими.

В п.4.4 приведены основные результаты численного моделирования динамики пучка в фотопушки ускорителя-инжектора на 6-7 ГэВ ИССИ-4 (СИЛА). Предложена схема поперечной фокусировки пучка, которая позволяет эффективно контролировать форму пучка.

В заключении сформулированы основные результаты и практическая значимость диссертационной работы:

1. Разработана электродинамическая модель бипериодической ускоряющей структуры с рабочей частотой 27 ГГц на энергию 6 МэВ. Настроен ввод мощности. С помощью численного моделирования изучена динамика пучка высокой яркости. По результатам тепловых расчетов были определены необходимые параметры системы термостабилизации, позволяющие ограничить максимальную температуру до 60°C. В качестве альтернативы была рассмотрена более простая для изготовления призматическая бипериодическая ускоряющая структура, показавшая более высокое значение шунтового сопротивления 170 МОм/м и добротности 4600 по сравнению с аксиально-симметричной структурой (130 МОм/м и 4080).

2. Для НПП «Корад» разработан и внедрен для серии линейных ускорителей электронов на 2, 8 и 10 МэВ ряд систем термостабилизации ускоряющих структур на основе двойного коаксиального кожуха.

3. Выполнено моделирование динамики пучка высокой яркости на установке КЕК LUCX, которое показало корректные результаты и согласуется с экспериментальными данными. Проведено измерение поперечного эмиттанта фемтосекундного электронного пучка методом квадрупольного-сканирования.

4. Проведено численное моделирование динамики пучка и исследование электродинамических характеристик для фотоинжектора нового линейного ускорителя-инжектора для Будущего Кольцевого Коллайдера CERN FCC-ee. Рассмотрены две возможные схемы структуры линейного ускорителя: с одной ВЧ фотопушкой, с фотопушкой для

инжекции пучка и ВЧ-пушкой с термокатодом для ускорения пучка с последующей конверсией e^-/e^+ .

5. Выполнено моделирование динамики пучка в фотопушке для Специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения ИССИ-4 (СИЛА). Предложена эффективная схема поперечной фокусировки пучка.

Список цитируемых источников

*1 S.M. Hanna, Applications of X-band of technology in medical accelerators, Proc. of PAC'99, p. 2516

*2 N. H. Quyet, M. Uesaka, H. Iijima et al., Overall quality comparison of C-band and X-band medical linacs, Proc. of EPA C'04, p. 2670

*3 Future Circular Collider Study Kickoff Meeting, University of Geneva, 12–15 February 2014, <http://indico.cern.ch/e/fcc-kickoff>

*4 R. Agustsson et al., Normal conducting radio frequency X-band deflecting cavity fabrication and validation, IPAC2012, pp 3389-3391, ISBN 978-3-95450-115-1

*5 V.I. Rachichikov, Problems of atomic science and technology, Series Nuclear Physics Investigation, 10 (18), 50 (1990)

*6 A. N. Didenko, V. I. Rashchikov, V. E. Fortov, Technical Physics 56 (10), 1535 (2011), DOI 10.1134/S1063734211100069

*7 T.V. Bondarenko, E.S. Masunov, S.M. Polozov BEAMDULAC-BL code for 3D simulation of electron beam dynamics taking into account beam loading and coulomb field // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations, 2013. №6 (88), pp. 114-118. ISSN 1562-6016

*8 Aryshev et al., CS2Te photocathode response time measurement and femtosecond comb electron beam generation as a milestone toward pre-bunched THz FEL realization, Proc. IPAC-2016, pp. 3941-3943

Статьи, опубликованные в журналах из перечня Scopus и Web of Science

1. **Yu.D. Kliuchevskaia**, S.M. Polozov, Electron beam dynamics simulation in the compact 27 Ghz 6 Mev linac. Proc. of BDO-2014, Saint-Petersburg, Russia,

pp. 86-87

2. T.V. Bondarenko, **Yu.D. Kliuchevskaia**, S.M. Polozov et al. The base parameters of the compact of 27 GHz electron linac for medical application. Proc. of IPAC 2014, pp. 2189-2191
3. **Yu.D. Kliuchevskaia**, S.M. Polozov. Thermal simulations of the biperiodical accelerating structure with the operating frequency 27 GHz. Proc. of XXIV Russian Particle Accelerators Conference, RuPAC-2014, pp. 237-239
4. **Yu.D. Kliuchevskaia**, T.V. Bondarenko, S.M. Polozov. Simulation of the electron beam dynamics in the biperiodical structure. Proc. LINAC-2014, pp. 1096-1098
5. D. Bazyl, T. Bondarenko, **Y. Kliuchevskaia** et al. New 10 MeV High-power electron linac for industrial application. Proc. of IPAC-2016, Busan, Korea, pp. 1794-1796
6. D. Bazyl, T. Bondarenko, **Y. Kliuchevskaia** et al. Commissioning and First Tests of the New Standing Wave 10 MeV Electron Accelerator. Proc. of XXV Russian Particle Accelerators Conference, RuPAC-2016, Saint-Petersburg, Russia, pp. 173-175
7. **Yu.D. Kliuchevskaia**, S.M. Polozov et al. Pre-bunched electron beam emittance simulation and measurement. Proc. IPAC-2016, pp. 1864-1866
8. **Yu.D. Kliuchevskaia**, S.M. Polozov. Simulation of variation characteristics at termostabilisation of 27 GHz biperiodical accelerating structure, Journal of Physics: Conference Series 732 (2016) p. 012041. XI International Symposium on Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS2015)
9. I.A. Ashanin, **Yu.D. Kliuchevskaia**, M.V. Lalayan et al. Beam dynamics simulation results in the 6 GeV Top-Up injection linac of the 4th generation light source USSR. Proc. of XXVI Russian Particle Accelerators Conference, RuPAC-2018, Protvino, Russia, pp. 285-288
10. **Yu.D. Kliuchevskaia**, S.M. Polozov et al. Conceptual design of a dedicated fourth-generation specialized synchrotron radiation source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute, Physics of Atomic Nuclei 81(11), 2018, pp. 1646-1651
11. I.A. Ashanin, **Yu.D. Kliuchevskaia**, A.A. Makhoro et al. Beam dynamics

simulation in the linear accelerator used as an injector for the 4th generation Specialized Synchrotron Radiation Source SSRS-4, Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes, 2019, vol. 15, iss. 1, pp. 126–139

12. **Yu.D. Kliuchevskaia**, S.M. Polozov. Beam dynamics simulation in a linear accelerator for CERN Future Circular Collider. Cybernetic and physics, Vol. 9, No. 2, 2020, 98–102, № 2, pp. 192–199

**Публикация в рецензируемом журнале, включённом в перечень,
сформированный Минобрнауки России:**

13. **Ю.Д. Ключевская**, Компактный ускоритель электронов с рабочей частотой 27 ГГц, Электронная техника, серия 1: СВЧ-Техника, научно-технический сборник, 2015, вып. 3, С. 111-118

Публикации в журналах и сборниках трудов конференций:

14. **Ю.Д. Ключевская**. Система охлаждения бипериодической ускоряющей структуры, XIX международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов "Молодежь и наука". Тезисы докладов, 2015. С. 124-125

15. **Ю.Д. Ключевская**, С.М. Полозов. Вариационные характеристики бипериодической ускоряющей структуры с рабочей частотой 27 ГГц, Сборник научных трудов II Международной конференции Лазерные, плазменные исследования и технологии, ЛаПлаз 2016, С. 175

16. Т.В. Бондаренко, **Ю.Д. Ключевская** и др. Разработка и создание новой модели промышленного ускорителя электронов на энергию 10 МэВ, Сборник научных трудов III Международной конференции Лазерные, плазменные исследования и технологии, ЛаПлаз 2017. С. 45

17. И. А. Ашанин, **Ю.Д. Ключевская** и др. Текущие результаты работ по разработке ускорительного комплекса российского специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4. Сборник научных трудов V Международной конференции Лазерные, плазменные исследования и технологии, ЛаПлаз 2019, т. 2, с. 110-111.

Ключевская Юлия Денисовна

Динамика пучков с высокой яркостью в линейных ускорителях

электронов, предназначенных для генерации излучения

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____