

На правах рукописи



Левичев Алексей Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА
КОНЦЕПЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ –
ИНЖЕКТОРА ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ ЦКП «СКИФ»**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2025

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

НАУЧНЫЙ – доктор физико-математических наук, академик РАН
РУКОВОДИТЕЛЬ Логачев Павел Владимирович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЗОЛОТУХИН – доктор физико-математических наук, профессор,
Денис Борисович Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», ведущий научный сотрудник;

КРАВЧУК – доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
Леонид Федеральное государственное бюджетное учреждение
Владимирович науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, главный научный сотрудник;

ШВЕДУНОВ – доктор физико-математических наук, профессор,
Василий Иванович Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, главный научный сотрудник;

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение
ОРГАНИЗАЦИЯ "Национальный исследовательский центр
"Курчатовский институт".

Защита диссертации состоится «14» октября 2025 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО РАН и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «28» мая 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Лотов Константин
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Синхротронным называется электромагнитное излучение ультрарелятивистских заряженных частиц, движущихся в магнитном поле и испытывающих ускорение, перпендикулярное вектору скорости. Синхротронное излучение (СИ) является эффективным и универсальным инструментом для широкого спектра исследований вещества и материалов, а также для технологических применений в различных областях науки и техники [1].

Источниками СИ служат накопители электронов с характерной энергией в несколько ГэВ. В таких установках интенсивные (с током в несколько сотен миллиампер) пучки заряженных частиц, двигаясь в поперечном магнитном поле, создают мощное и яркое излучение, которое по каналам вывода поступает на большое число экспериментальных станций для проведения исследований.

В мире работают несколько десятков источников СИ, где проводят исследования в области физики, химии, биологии, медицины, геологии, археологии, материаловедения, а также используют излучение для прикладных применений. Это самый многочисленный класс накопителей электронных пучков ультрарелятивистских энергий.

Одним из важнейших параметров таких источников является яркость – число фотонов, излучаемых в единицу времени с единицы площади источника в единицу телесного угла (плотность потока фотонов в фазовом объеме источника) [2]. Данная величина тем выше, чем больше ток пучка и чем меньше произведение угловых и пространственных размеров (эмиттанс, фазовый объем пучка). Увеличение тока пучка приводит к увеличению мощности излучения и, как следствие, к нежелательному росту тепловой нагрузки на элементы вакуумного и оптического тракта, экспериментальное оборудование и образец. Поэтому основным методом увеличения яркости источника СИ является уменьшение эмиттанса электронного пучка.

По величине эмиттанса источники СИ условно делятся на несколько поколений:

1. Не специализированные установки (синхротроны или коллайдеры в «паразитном» режиме) с характерным горизонтальным эмиттансом $\epsilon_x \sim 300-500$ нм·рад.
2. Специализированные накопители электронов. Излучение выводится из магнитов и вигглеров. $\epsilon_x \sim 20-100$ нм·рад.
3. Специализированные и оптимизированные накопители электронов, основными излучателями служат ондуляторы. Эмиттанс минимизирован до значений $\epsilon_x \sim 1-10$ нм·рад.

4. Специализированные, высокотехнологичные и оптимизированные накопители с высокой степенью минимизации эмиттанса до значений $\epsilon_x \sim 500 \div 50$ пм·рад, приближающегося к дифракционному пределу для используемых длин волн СИ.

Примеры источников СИ разных поколений, их параметры и характеристики, а также ссылки на литературу могут быть найдены в [3].

Современные источники СИ функционируют в течение долгого времени жизни пучка, для поддержания которого потерянные в накопителе частицы восполняются малыми порциями так, чтобы средний ток (и тепловой режим оборудования) был постоянным с точностью $\sim 1\%$ (top-up инжекция). Поэтому эффективность инжекции, стабильность параметров, надежность, гибкость перестройки режимов инжектора, определяющие последовательность заполнения накопителя ступками электронов, время жизни пучка, достижимый ток в накопителе и т.д. очень важны.

В настоящее время в наукограде Кольцово Новосибирской области создается современный источник СИ четвертого поколения Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») [4]. Ускорительный комплекс ЦКП «СКИФ» включает линейный ускоритель электронов с энергией 200 МэВ, промежуточный синхротрон-бустер и накопительное кольцо с энергией 3 ГэВ и длиной орбиты 476 м [5]. Проектный «естественный» (без вставных устройств и при нулевом токе пучка и связи мод бетатронных колебаний) горизонтальный эмиттанс пучка в накопителе равен 73.2 пм·рад [6].

Диссертационная работа описывает разработку и создание линейного ускорителя для инжекционного комплекса ЦКП «СКИФ», включая мощный клистрон-усилитель и другие системы. В процессе работы была рассчитана, разработана, создана и испытана начальная, самая ответственная и сложная часть линейного ускорителя от источника электронов до первой регулярной ускоряющей секции включительно. Диагностический электронно-оптический канал, оснащенный необходимой измерительной аппаратурой, позволил провести эксперименты, подтвердившие адекватность выбранных решений. Для обеспечения питания ускоряющих структур сверхвысокочастотной (СВЧ) мощностью был разработан, изготовлен и измерен мощный импульсный клистрон. Данная разработка позволила отказаться от импортных клистронов, которые перестали быть доступны в Российской Федерации. Необходимые параметры клистрона были продемонстрированы на созданном стенде. Следует отметить, что, так как клистроны с импульсной мощностью более 20 МВт используются только для создания линейных ускорителей частиц высокой (более 100 МэВ) энергии, то они фактически являются элементами ускорительной техники. В частности, требования к параметрам клистронов

определяются параметрами ускоряющих структур, для возбуждения которых эти клистроны создаются.

Пучок с энергией 200 МэВ, в котором интенсивность, число и последовательность сгустков электронов определяются условиями и требованиями исследований, инжектируется из линейного ускорителя с частотой 1 Гц в синхротрон-бустер, где электроны, после подъема энергии до 3 ГэВ, перепускаются по транспортному каналу в основной накопитель. Именно в линейном ускорителе происходит формирование пучка, которое определяет параметры работы всего инжекционного комплекса и непосредственно источника СИ.

Поскольку источник СИ четвертого поколения создается в России впервые, то разработка для него линейного ускорителя является важной и актуальной задачей. ЦКП «СКИФ» должен обеспечивать обширную программу исследований, в том числе эксперименты с временным разрешением, для которых характер заполнения накопителя небольшим числом (вплоть до одного) интенсивных сгустков диктуется пользователями. Это накладывает дополнительные требования на возможность реализации различных режимов работы линейного ускорителя, применение гибкого управления не только током пучка, но последовательностью инжектируемых сгустков, их скважностью и частотой повторения.

Отдельно стоит отметить, что ускорение электронов происходит в сверхвысокочастотном электромагнитном поле, которое создается в ускоряющих структурах ускорителя с помощью СВЧ усилителей-клистронов. Для увеличения темпа ускорения и уменьшения размеров линейного ускорителя клистроны должны обеспечивать выходную импульсную мощность в десятки мегаватт. Такие устройства уникальны и ранее были доступны только за рубежом. Разработка отечественного клистрона, описанного ниже и обеспечивающего необходимую выходную СВЧ мощность в рамках создания линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», также подчеркивает актуальность представленной работы.

Актуальной задачей является разработка линейного ускорителя инжекционного комплекса ЦКП «СКИФ», а также СВЧ усилителя-клистрона, который служит источником электромагнитной волны для регулярных ускоряющих структур.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время общепринятой считается двухкаскадная схема инжекции в источник СИ с использованием в качестве первой ступени линейного ускорителя с энергией пучка ~100-200 МэВ. После линейного ускорителя пучок вводится в синхротрон-бустер, ускоряющий электроны до энергии эксперимента. Возможен вариант с использованием только линейного

ускорителя на полную энергию. В любом случае в источниках СИ 3-4 поколений ускорение в накопительном кольце считается недопустимым из-за требования тепловой стабильности ускорительного и экспериментального оборудования, которая, в свою очередь обеспечивает пространственную стабильность пучка электронов и синхротронного излучения. Весь инжекционный комплекс работает с характерной частотой повторения порядка 1 Гц.

Для двухкаскадных схем выходная энергия пучка после линейного ускорителя для разных проектов составляет $\sim 100\div 200$ МэВ. Так, например, в инжекторе NSLS-II (США) [7, 8] используется линейный ускоритель с энергией электронов 200 МэВ. Он состоит из высоковольтной электронной пушки с постоянным напряжением 90 кВ с триодным катодом EIMAC YU171. Пушка работает либо в одногустковом (заряд 0.5 нКл), либо в многоструктурном режиме (период последовательности 2 нс, длительность импульса 160-300 нс, полный заряд 15 нКл). Величина тока регулируется модулятором катодно-сеточного узла, который также работает либо в одноимпульсном режиме, либо с частотой 500 МГц. Далее частицы попадают в группирующий резонатор, работающий на частоте 500 МГц. После этого следуют предгруппирователь и группирователь на бегущей волне, работающие на основной частоте регулярных ускоряющих структур 2998 МГц. Регулярное ускорение происходит в пятиметровых ускоряющих структурах на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным градиентом с рабочей модой колебания $2\pi/3$. Запитаны структуры от двух клистронов Canon E37302A, каждый из которых обеспечивает 45 МВт выходной импульсной СВЧ мощности на частоте 2998 МГц.

Другим примером современного источника синхротронного излучения 4-го поколения является Европейский источник СИ ESRF-EBS (Франция), где инжекционная часть также состоит из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ и синхротрона-бустера с выходной энергией 6 ГэВ.

Линейный ускоритель инжектора ESRF-EBS состоит из высоковольтной электронной пушки с напряжением 90 кВ. Катодный узел использует катод EIMAC Y-845 и имеет управление по сетке. Последующая фокусировка пучка осуществляется четырьмя соленоидами [9]. Для продольной группировки применяются предгруппирователь и группирователь, работающие на частоте регулярных ускоряющих секций 2998 МГц. Предгруппирователь обеспечивает дополнительный энергетический разброс в пучке ± 10 кВ, который в промежутке дрейфа переходит в пространственную модуляцию плотности частиц пучка. Группирователь состоит из 22 ячеек, работающих в режиме стоячей волны на моде колебания $\pi/2$ с максимальной амплитудой ускоряющего поля 25 МВ/м и обеспечивает выходную энергию пучка 15 МэВ [9]. Регулярное ускорение пучка осуществляется двумя шестиметровыми ускоряющими структурами на основе круглого диафрагмированного

волновода с постоянным градиентом, работающих на $2\pi/3$ -моду колебания. В качестве источников ускоряющего поля используются два клистрона Thomson TH2100 с СВЧ мощностью 35 МВт. Частота работы электронной пушки 1 Гц или 10 Гц. Модулятор клистрона может работать с частотой до 10 Гц [10].

Отличается от рассмотренных каскадных схем инжекционный комплекс источника СИ четвертого поколения MAX IV (Швеция), где не используется промежуточный синхротрон-бустер, и линейный ускоритель поставляет пучок электронов на энергии эксперимента в два источника СИ с энергиями 1.5 ГэВ и 3 ГэВ соответственно, а также будет снабжать электронами лазер на свободных электронах [11].

В регулярном режиме линейный ускоритель MAX IV работает с частотой повторения 100 Гц и зарядом в одном сгустке 100 пКл. СВЧ фотопушка обеспечивает три сгустка, разделенных периодом ускоряющего поля (3 ГГц). Быстрый отклоняющий магнит («кикер») направляет эти три сгустка в соответствующее накопительное кольцо (1.5 ГэВ или 3 ГэВ). «Кикер» работает с частотой 10 Гц. Линейный ускоритель сконструирован по модульному принципу. Один ускоряющий модуль состоит из клистрона мощностью 35 МВт и двух ускоряющих структур с частотой 3 ГГц на основе диафрагмированного волновода с постоянным градиентом, запитанных от системы умножения мощности SLED [12]. Ускоряющая структура длиной 5.2 м обеспечивает набор энергии электронов 95 МэВ.

Необходимость инъекции сразу в три установки (накопительные кольца с энергиями 1.5 ГэВ и 3 ГэВ, и в лазер на свободных электронах) диктует особенность построения инжекционного комплекса MAX-IV. Для проекта ЦКП «СКИФ» такая схема выглядит сложной, неактуальной и дорогой. В итоге, нами была взята за основу каскадная схема с энергией пучка 200 МэВ после линейного ускорителя, близкая к схемам NSLS-II и ESRF-EBS, которая опирается на компетенции, технологии и опыт Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН).

В нашем линейном ускорителе используются ускоряющие структуры на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным импедансом длиной 3 м, что должно уменьшить стоимость изготовления по сравнению со структурами с постоянным градиентом. В качестве источника электронов было решено использовать высокочастотную (ВЧ) пушку с термоэмиссионным катодом, работающую на 1/16 частоты регулярных ускоряющих структур (178.5 МГц), с сеточным управлением током пучка, которое обеспечивается модулятором, работающим с той же максимальной частотой 178.5 МГц. В этом случае, по нашему мнению, достигается определенный компромисс. Резонатор высокочастотной пушки способен обеспечить достаточно высокую выходную энергию пучка, близкую к 1 МэВ,

что, с одной стороны, все еще позволяет использовать клистронную группировку пучка, а с другой – такая энергия достаточна, чтобы при следующем предускорении пучка использовать стандартную структуру на бегущей волне без изменения ее фазовой скорости, что значительно упрощает производство изделия. Кроме этого, модулятор управления током пучка обеспечивает определенную фазовую задержку по отношению к ускоряющему полю резонатора ВЧ пушки. Это приводит к дополнительной возможности управления вытягиваемым зарядом, его длительностью и процессом начальной продольной группировки пучка. Таким образом, линейный ускоритель инжектора ЦКП «СКИФ» опирается на мировой опыт создания подобных установок, но обладает своими уникальными особенностями, достоинствами и возможностями.

Цели и задачи

Целью работы являлась разработка всего комплекса линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», включая клистрон, производство его оборудования, а также испытание и проверка наиболее сложных систем линейного ускорителя при работе с пучком и выходных параметров клистрона на отдельном стенде.

В рамках этой цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Расчет параметров мощного импульсного клистрона. Разработка технологии изготовления, как элементов клистрона, так и всего клистрона в целом.
2. Определение необходимых частотных характеристик резонаторов клистрона. Получение проектных выходных параметров клистрона, измерение выходной СВЧ мощности.
3. Обоснование концептуальных решений, схемы и конструкции систем линейного ускорителя. Определение основных принципов его работы и состава элементов. Создание комплексной схемы установки с учетом всех подсистем.
4. Теоретические оценки возможности достижения необходимых параметров пучка с учетом разработанной концепции ускорителя и схемы его работы.
5. Моделирование основных элементов ускорителя. Расчет динамики пучка с учетом реалистичных ошибок, погрешностей и неточностей изготовления и функционирования отдельных элементов.
6. Выбор и обоснование конструктивных и технологических решений.
7. Разработка и испытание основных компонентов, включая источник электронов – ВЧ пушку, канал группировки пучка, первую секцию регулярного ускорения, системы фокусировки, диагностики и коррекции траектории пучка и т.д.

8. Разработка и создание стенда ЛИНАК-20, который является начальной частью линейного ускорителя инжектора СКИФ до второй регулярной ускоряющей структуры.

Экспериментальное исследование работы элементов ускорителя. Получение ускоренного пучка на стенде ЛИНАК-20, исследование его параметров. Демонстрация достижения характеристик, требуемых для создания полноценного линейного ускорителя – инжектора источника СИ четвертого поколения ЦКП «СКИФ».

Научная новизна

Следует заметить, что сроки создания линейного ускорителя инжектора, определенные государственным контрактом на создание ЦКП «СКИФ», были весьма сжаты. В связи с этим в конструкции линейного ускорителя максимально использованы узлы, ранее разработанные и произведенные в ИЯФ СО РАН, но с внесением существенных изменений, основанных на накопленном опыте их эксплуатации. Линейный ускоритель подобной схемы ранее в ИЯФ СО РАН и в России не создавался. Научная новизна проделанной работы заключается в следующем:

1. Впервые в России разработан, изготовлен и настроен на проектные параметры отечественный клистрон с выходной импульсной СВЧ мощностью 50 МВт при рабочей частоте 2856 МГц.
2. Впервые разработана и реализована схема линейного ускорителя инжектора источника синхротронного излучения на основе субгармонической (рабочая частота 178.5 МГц) ВЧ пушки с термоэмиссионным катодом и управлением тока пучка по сетке с одним предускорителем-группирователем, работающим в режиме бегущей волны без изменения ее фазовой скорости.
3. Впервые создан специализированный экспериментальный стенд, включающий в себя источник электронов, канал группировки и первую регулярную ускоряющую структуру линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», продемонстрировавший адекватность и работоспособность принятых и использованных решений.
4. Впервые на основе оригинальной концепции получен ускоренный пучок и измерены его параметры с использованием созданного стенда на основе линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ».

Теоретическая и практическая значимость

Выполненные **теоретические исследования** позволили определить схему линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ». Выбранная схема является достаточно гибкой с точки зрения управления током пучка и его

длительностью. Предложенная магнитная система фокусировки и нацеливания пучка проста в изготовлении и эффективна при настройке и эксплуатации ускорителя. Найденные решения могут в будущем использоваться для разработки инжекторов источников синхротронного излучения, демпфирующих колец или электрон-позитронных коллайдеров. Проведенные исследования привели к созданию отечественно мощного СВЧ усилителя – клистрона, способного питать ускоряющие структуры линейных ускорителей. Ранее такая техника в России не производилась. Теоретическая проработка позволила оценить необходимую точность изготовления резонансных ячеек ускоряющих структур и определить технологию их производства, а также выработать способ уменьшения влияния погрешности изготовления ускоряющих ячеек на параметры пучка.

Практическая значимость представляемой диссертации заключается в методическом комплексном описании всего цикла разработки и производства высокоэнергетических линейных СВЧ ускорителей электронов для различных научных комплексов, таких как источники электромагнитного излучения или коллайдеры, начиная от формулировки основных идей и заканчивая получением и исследованием ускоренного пучка электронов. Разработанные устройства и технологии производства позволяют создавать не только непосредственно линейные ускорители, но и источники СВЧ мощности клистроны для питания ускоряющих структур.

Методология и методы исследования

В процессе работы над поставленной задачей по созданию линейного ускорителя инжектора источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ» использовались аналитические и численные методы расчётов высокочастотного электромагнитного поля и динамики пучка в линейных ускорителях. Результаты аналитических расчётов проверялись результатами численного моделирования и показали хорошее согласие. Заключительным способом проверки корректности выбранных концепций и решений являлась разработка и тестирование ключевых элементов и прототипов узлов ускорителя. Экспериментальное исследование динамики и параметров пучка продемонстрировало соответствие теоретических расчетов и экспериментальных данных, тем самым подтвердив пригодность как выбранной концепции, так и адекватность конкретных технических решений.

При создании клистрона была сформирована его теоретическая модель, основанная на разработанных и опубликованных ранее методиках. Эта модель была проверена в ходе численного моделирования с использованием 2D и 3D кодов. Было достигнуто приемлемое согласование результатов, полученных разными способами. Экспериментальные измерения параметров созданного клистрона соответствуют его теоретической модели.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты проделанных расчетов нового мощного импульсного клистрона показывают возможность получения выходной импульсной СВЧ мощности 50 МВт на рабочей частоте 2856 МГц.
2. Разработанный и созданный макет клистрона позволил провести экспериментальное исследование и оптимизацию параметров клистрона.
3. Измеренные параметры клистрона подтвердили правильность учета эффектов, влияющих на параметры электронного пучка и выходного СВЧ сигнала, а также работоспособность клистрона в нужных режимах с выходной импульсной мощностью 50 МВт.
4. Разработанные концептуальная схема и конструкция линейного ускорителя позволили получить пучок электронов с параметрами, требуемыми для инжектора источника СИ ЦКП «СКИФ».
5. Измеренные параметры пучка электронов в начальной части линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» подтверждают правильность расчетов и эффективность технических решений, использованных при создании линейного ускорителя.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, анализом полученных данных и сравнением их с теоретическими.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. XIV Международный семинар по проблематике ускорителей заряженных частиц памяти проф. В.П. Саранцева, Россия, г. Алушта, 22-25 сентября 2022 г.
2. XXVIII Международная конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC 2023, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия, г. Новосибирск, 11-15 сентября 2023 г.
3. Рабочее совещание по проблемам создания источника синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ», 21-22 марта 2019 г., ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.
4. Рабочее совещание по проблемам создания источника синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ», 7-8 сентября 2023 г., ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

По теме диссертации опубликованы 15 работ в печатных и электронных изданиях, из них 12 статей с основными результатами в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Личный вклад автора диссертации в получение результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Им были утверждены концептуальные и технические решения, включая конструкцию линейного ускорителя и его основных систем [13, 14, 15]. Проведен анализ достижимости необходимых параметров пучка при выбранной концептуальной схеме линейного ускорителя [16, 17, 18, 19]. Под его руководством выбраны технологические решения и изготовлены базовые элементы линейного ускорителя [20], сконструирован клистрон и выработана технология его изготовления [21, 22], а также создан стенд с полномасштабным макетом клистрона. На стенде были экспериментально изучены и оптимизированы параметры клистрона. Автором лично были настроены частотные характеристики резонаторов клистрона, получены и измерены его выходные характеристики [23]. Под руководством автора был запущен стенд на основе линейного ускорителя ЛИНАК-20, получен пучок электронов, измерены его параметры [24].

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 203 страницы, включая 169 рисунков. Библиография включает 79 наименований на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения исследований, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизны темы исследования, показана теоретическая и практическая значимости полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена общему описанию линейного ускорителя инжектора.

В параграфе **1.1** приведено описание источника СИ четвертого поколения ЦКП «СКИФ», приведена его схема и даны основные проектные параметры. Комплекс состоит из линейного ускорителя с энергией электронов 200 МэВ, накопительного синхротрона с энергией 3 ГэВ и основного кольца с энергией 3 ГэВ [4].

В параграфе **1.2** описаны схема (см. рисунок 1) и состав линейного ускорителя инжекционного комплекса ЦКП «СКИФ» [15], приведена временная схема работы ускорителя, даны необходимые проектные параметры пучка, изложенные в таблице 1. Ускоритель состоит из источника электронов, канала группировки и предускорения пучка, пяти регулярных ускоряющих структур на основе диафрагмированных волноводов с постоянным импедансом с бегущим типом волны.

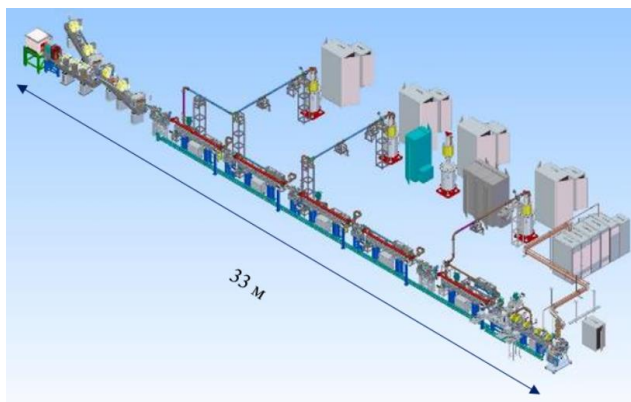


Рисунок 1 – 3D модель линейного ускорителя с клистронной галереей

Таблица 1 – Проектные параметры линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Энергия электронов	200 МэВ
Частота циклов	1 Гц
Геометр. эмиттанс на 200 МэВ	150 нм
Разброс по энергии на 200 МэВ	≤ 1% (rms)

В параграфе **1.3** описан источник электронов ускорителя и принцип его работы. Источником является ВЧ пушка, работающая на частоте 178.5 МГц, имеющая катодно-сеточный узел, позволяющий использовать модулятор импульсов для управления током пучка.

В параграфе **1.4** приведена схема и описание канала группировки пучка и его предускорения. Канал состоит из резонатора, работающего на утроенной частоте ВЧ пушки 535.5 МГц. После резонатора и промежутка дрейфа располагается предускоритель-группирователь, который является укороченной версией регулярной ускоряющей структуры. Для поперечной динамики пучка используется магнитная система на основе соленоидов. Из-за важности данного промежутка с точки зрения формирования пучка имеется необходимое количество оптической и электромагнитной диагностики.

Параграф **1.5** описывает часть ускорителя с регулярными ускоряющими структурами. Приводится описание такой структуры и ожидаемые характеристики. Каждая структура имеет длину 3 м и является диафрагмированным волноводом с бегущим типом волны с рабочей частотой 2856 МГц с видом колебания (набегом фазы волны на период ускоряющей ячейки) $2\pi/3$ с постоянным импедансом [20].

В параграфе **1.6** приведены схемы волноводного тракта для питания регулярных ускоряющих структур и предускорителя-группирователя СВЧ мощностью, поступающей от трех клистронов. Первый клистрон питает предускоритель-группирователь и первую регулярную ускоряющую структуру. Мощность между ними делится 1:4 с помощью 7 дБ-го волноводного ответвителя. Последующие клистроны делят свою мощность между двумя ускоряющими структурами поровну с помощью 3 дБ-ых волноводных мостов. Каждая из структур имеет механический волноводный фазовращатель, а предускоритель-группирователь – волноводный аттенуатор для более точной настройки входной мощности. Так же предусмотрены волноводные диагностические ответвители для определения огибающих падающих и отраженных волн в волноводном тракте.

Параграф **1.7** описывает параметры и общий вид клистронов необходимого для питания СВЧ мощностью регулярные ускоряющие структуры и

предускоритель-группирователь. Его рабочая частота должна быть 2856 МГц, импульсная СВЧ мощность не менее 50 МВт, длительность СВЧ импульса не менее 1 мкс. Клистрон должен работать с частотой до 10 Гц в режиме тренировки ускоряющих структур и волноводного тракта, 1 Гц в режиме регулярной работы ускорителя.

В параграфе **1.8** приводится схема и состав магнитной системы линейного ускорителя. До первой регулярной ускоряющей структуры используются соленоиды различного типа, после – квадрупольные линзы. В конце ускорителя располагается диагностический промежуток с триплетом, дипольным спектрометром и цилиндром Фарадея. Для коррекции положения пучка применяются малые и большие корректора в зависимости от энергии пучка.

Параграф **1.9** дает описание системы диагностики пучка, которая выполнена на основе люминофорных датчиков, датчиков положения пучка, трансформаторов тока и черенковских датчиков. Последний служит для определения длительности ускоренного пучка и работает в паре со стрик-камерой.

В параграфе **1.10** даны требования на вакуумную систему линейного ускорителя и волноводного тракта.

В параграфе **1.11** приведена принципиальная схема системы термостабилизации для поддержания заданной температуры, необходимой для стабилизации рабочей частоты резонансных элементов ускорителя.

В параграфе **1.12** приведено общее заключение к Главе 1.

Вторая глава посвящена моделированию и оптимизации пучка в линейном ускорителе.

В параграфе **2.1** приводится анализ захвата электронов в режим ускорения. Анализ выполнен на основе уравнений движения частиц в продольной фазовой плоскости при ускорении в структурах на основе диафрагмированных волноводов с бегущим типом колебания [19]. В результате данного анализа получены диаграммы захвата частиц в режим ускорения для разных амплитуд ускоряющих полей и разных начальных энергиях частиц. Кроме этого на основе анализа продольного фазового движения частиц делается вывод об условиях группировки пучка. В результате всех анализов, с учетом начальной энергии пучка после ВЧ пушки в районе 0.7 МэВ, приводится обоснование амплитуд ускоряющих полей в предускорителе-группирователе и первой регулярной ускоряющей структуры, которые составили 10 МВ/м и 20 МВ/м соответственно. С учетом этого приводятся достижимые продольные размеры пучка, которые в итоге должны обеспечивать необходимый энергетический разброс.

В параграфе **2.2** описано моделирование ВЧ пушки с катодно-сеточным узлом, а также моделирование динамики пучка с зарядами 0.3 нКл и 1 нКл. Показано, что в зависимости от фазы инъекции при выбранном дизайне ВЧ пушки достигаются инжектируемые заряды более 1 нКл, характерная продольная среднеквадратичная (rms) длительность пучка в районе 40 мм, а энергия – 0.7 МэВ [15]. Из этого следует, что временная протяженность пучка после пушки составит 147 пс, что с точки зрения регулярной ускоряющей структуры с частотой 2856 МГц соответствует фазовой протяженности 151° . С учетом анализа уравнений движения для продольной фазовой плоскости (параграф 2.1) следует, что перед предускорителем-группирователем пучок должен иметь фазовую протяженность в районе 34° . Таким образом, после ВЧ пушки пучок необходимо сгруппировать в продольном направлении минимум в 5 раз. Для этого может использоваться резонатор с частотой 535.5 МГц и промежуток дрейфа в районе 2.5 м.

Параграф **2.3** приводит аналитический расчет распределений амплитуд электрических полей в ускоряющих структурах и делается вывод о значениях СВЧ мощностей для предускорителя-группирователя и первой регулярной ускоряющей структуры исходя из полученных ранее амплитуд 10 МВ/м и 20 МВ/м соответственно. В итоге данные амплитуды отвечают входным СВЧ мощностям 10 МВт и 40 МВт соответственно. Для последующих регулярных ускоряющих структур начальная амплитуда электрического поля составляет в районе 17 МВ/м при входной СВЧ мощности 25 МВт, что является половиной максимальной мощности используемых клистронов.

В параграфе **2.4** приведено моделирование динамики частиц во всем линейном ускорителе. Обсуждается вопрос, связанный с нагрузкой током частиц электрических полей в ускоряющих структурах при ускорении 55 ступек с зарядом 0.3 нКл каждый [16]. Анализируется изменение параметров пучка при наличии ошибок выставки элементов линейного ускорителя, а также приводится необходимая фазово-временная стабильность резонансных элементов ускорителя для обеспечения расчетной динамики частиц. В итоге, расчетные параметры пучка приведены в таблице 2, фазово-временные стабильности в таблице 3.

В параграфе **2.5** приведены расчетные модели и полученные параметры магнитных элементов ускорителя, необходимые для обеспечения расчетной динамики частиц.

В параграфе **2.6** дано заключение к Главе 2.

Таблица 2 – Параметры пучка в конце линейного ускорителя

Параметры	Значение
Энергия	200 МэВ
Энергетический разброс в одиночном сгустке (RMS)	0.3 %
Горизонтальный эмиттанс	50 нм
Заряд пучка в одиночном сгустке	0.3 нКл
Энергетический разброс в последовательности 55	2.5%

Таблица 3 – Допуски на временную фазовую стабильность

Заряд, нКл	0.3	1
Для резонатора третьей гармоники, пс	51	21
Для структуры предускорителя-группирователя, пс	9.7	4.5
Для регулярных ускоряющих структур, пс	19	9.7
Минимальная величина фазовой стабильности	4.5°	

Третья глава посвящена требованиям на изготовление ускоряющих структур.

В параграфе **3.1** приводится вывод изменения фазы рабочего вида колебания (фазы волны на период, которая для нашего случая составляет $2\pi/3$) от изменений размеров одной ускоряющей ячейки периодичности.

В параграфе **3.2** анализируется влияние изменения частоты источника СВЧ мощности для регулярных ускоряющих структур с точки зрения набора энергии пучком. Показано, что при отклонении частоты в 0.5 МГц в структуре с постоянным импедансом средняя энергия составит около 68% от максимального значения при ускорении в оптимальной ускоряющей фазы.

Параграф **3.3** приводит статистический анализ влияния изменения фазы ускоряющей волны на элементе периодичности диафрагмированного волновода на выходную энергию и энергетический разброс в пучке. Анализ приводится на основе уравнения для набора энергии частицей при пролете одной ускоряющей ячейки периодичности [18]. В результате получено, что для ускоряющей структуры длиной 3 м и состоящей из 85 ускоряющих ячеек при постоянной ошибке в 2.163^0 получается нулевой прирост энергии. Данная ошибка соответствует изменению периода на 0.6 мм или радиуса ячейки -16

мкм. При наличии случайных ошибок в ячейках, расположенных внутри заданного диапазона, при достаточно значительной статистике получаем результат, приведенный в таблице 4.

Таблица 4 - Вероятные энергетические параметры пучка с $\sigma_\varphi = 1.7^0$ при пролете через ускоряющие структуры при различных диапазонах случайных фазовых ошибок

$\Delta\theta, ^\circ$	Наиболее вероятная средняя энергия, %	Ширина спектра энергий на полувывсоте, %	Среднеквадратичный энергетический разброса с вычетом разброса в пучке без ошибок, %
0	99.96	-	0
± 1	99.92	99.8	0.1
± 5	99.6	98.5	0.6
± 9	98.2	92.0	1.7

В параграфе 3.4 дано заключение к Главе 3.

Четвертая глава посвящена изготовлению элементов ускорителя.

В параграфе 4.1 описано изготовление ВЧ пушки, резонатора канала группировки и модулятора для управления током пучка с помощью напряжения смещения катодно-сеточного узла. Вид изготовленной ВЧ пушки и резонатора канала группировки показан на рисунке 2 [25].

Параграф 4.2 посвящен изготовлению магнитных элементов ускорителя. Виды магнитов, их количество и достигнутые поля приведены в таблице 5 [26].

Таблица 5 - Виды магнитов, их количество и рабочие значения полей

Магниты	Кол.	В, Тл	I, А
Соленоиды канала группировки	5	0.0858	6
Соленоиды предускорителя-группирователя	2	0.23	200
Согласующий соленоид	1	0.098	3
Корректора канала группировки	8	0.0019	3
Квадрупольные линзы	3	0.6 (интеграл)	6
Корректора регулярной части ускорителя	3	0.047	6

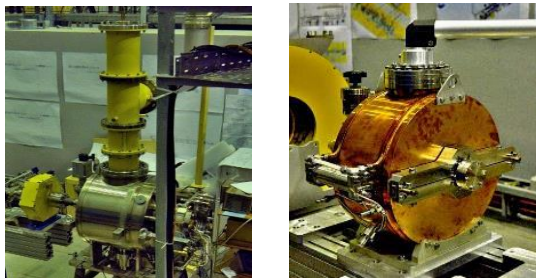


Рисунок 2 – Слева – изготовленная ВЧ пушка, справа – резонатор канала группировки

В параграфе 4.3 приводится описание процесса изготовления и измерения ускоряющих структур [20]. Достигнутые измеренные параметры приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Измеренные параметры ускоряющих структур

Структура	Рабочая частота при вакууме и рабочей температуре, МГц	Рабочая температура, °С	Суммарная ошибка фазы на структуру по модулю менее	RMS фазовое отклонение	Отражение по мощности
1	2856	36	0.8 ⁰	±1.2 ⁰	3%
2	2856	27	2.5 ⁰	±1.7 ⁰	2.5%
3	2856	31	0.9 ⁰	±1.5 ⁰	3%
4	2856	30	1.9 ⁰	±2.4 ⁰	2.4%
5	2856	36	1.7 ⁰	±4 ⁰	5%
Предускоритель-группирователь	2856	31	2 ⁰	±3 ⁰	3%

В параграфе 4.4 приводятся результаты изготовления некоторых других элементов ускорителя, включая элементы диагностики, термостабилизации, волноводного тракта и пр.

Параграф 4.5 посвящен заключению к Главе 4.

В Пятой главе дано описание расчета и изготовления клистрона.

В параграфе 5.1 описаны основные ориентиры, которые были выбраны при изготовлении клистрона для линейного ускорителя ЦКП «СКИФ».

Параграф 5.2 посвящен расчету катодного узла клистрона. Получено, что при выбранном дизайне катодного узла достижимый выходной ток должен составить 350 А при напряжении 350 кВ, что соответствует первеансу $1.8 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

В параграфе 5.3 приведен расчет поперечной динамики пучка и необходимое распределение магнитного поля от катушек с током внутри соленоида клистрона. Показано, что при магнитном поле на катоде в районе 5 мТ достигаются минимальные пульсации поперечного размера пучка в клистроне, при этом максимальная амплитуда поля на оси составляет в районе 0.125 Т с последующим спадом к коллектору клистрона. Обеспечиваться такое поле может тремя катушками и одной компенсирующей катушкой тока рядом с катодом.

Параграф 5.4 посвящен расчету возбуждающего резонатора. Поскольку данный резонатор является одним из ключевых в клистроне, то проведено не только моделирование, но и аналитический анализ полей в таком резонаторе при наличии нагрузки током пучка, который составляет 350 А. Анализ сделан на основе эквивалентной схемы замещения резонатора и при некотором допущении о возможности использования выражения для реактивной проводимости пучка, полученной для сеточного резонатора. В итоге было показано, что изменение частоты резонатора при нагрузке током пучка 350 А при напряжении 350 кВ составляет 2 МГц. При расчетной собственной добротности резонатора, для полного поглощения СВЧ мощности пучком, необходима величина связи с внешней линией в районе 42, что в реальности труднодостижимо. При этом при мощности возбуждающего генератора 500 Вт, эффективное напряжение, приобретаемое пучком, составит 2 кВ. При более реалистичном коэффициенте связи в районе 10, отражение СВЧ мощности от возбуждающего резонатора при наличии пучка с током 350 А и напряжением 350 кВ составит 36%, а приобретаемое эффективное напряжение 1.7 кВ при той же входной СВЧ мощности 500 Вт.

В параграфе 5.5 дается описание расчета канала группировки клистрона. В нем приведен дизайн клистрона, основные параметры группирующих резонаторов, такие как добротности, характеристические сопротивления, распределения полей и основные выражения для аналитического расчета процесса группировки пучка [27]. При этом начальные параметры пучка задаются в первом возбуждающем резонаторе и описаны в параграфе 5.4. Кроме аналитического расчета также приводятся результаты численных моделирований. Коэффициент усиления для различных расчетов показан на рисунке 3. В итоге все расчеты продемонстрировали усиление не хуже 50 дБ, что дало возможность приступить к реальному изготовлению клистрона.

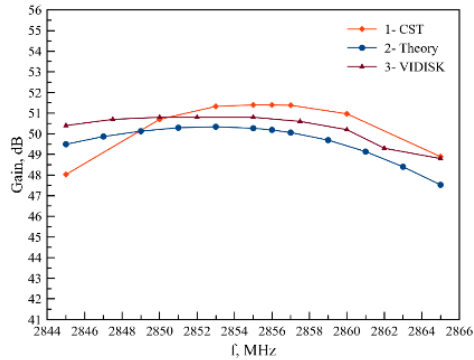


Рисунок 3 - Коэффициент усиления клистрона при токе пучка 350 А и напряжении 350 кВ: 1 – моделирование программой CST-Studio, 2 – теоретическая оценка, 3 – одномерный численный расчет с помощью кода VIDISK

Параграф **5.6** посвящен изготовлению клистрона и его элементов [21, 22, 23].

В параграфе **5.7** дано описание измерений параметров клистрона. Стенд с клистроном показан на рисунке 4, а полученная выходная СВЧ мощность приведена на рисунке 5 [23]. В этом же параграфе упоминается второй изготовленный клистрон с исправленными ошибками, допущенными в первом макете, который показал выходную СВЧ мощность 58 МВт.



Рисунок 4 – Стенд для испытания клистрона: 1 и 2 соленоид и система группировки пучка внутри соленоида соответственно, 3 – измерительные волноводные ответвители, 4 – выходное вакуумное волноводное окно, 5 – согласованная водяная нагрузка, 6 – магниторазрядный насос

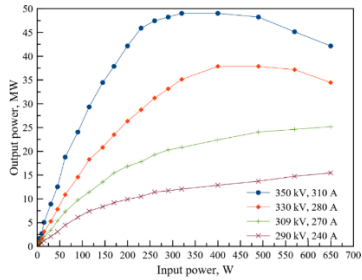


Рисунок 5 – Зависимость выходной импульсной СВЧ мощности клистрона от входной при разных токах пучка клистрона

В параграфе 5.8 приведено заключение к Главе 5.

Шестая глава посвящена работе стенда линейного ускорителя ЛИНАК-20.

В параграфе 6.1 приведена схема и описание стенда ЛИНАК-20. Данный стенд является начальной частью линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» до второй регулярной ускоряющей структуры. Он включает в себя ВЧ пушку, канал группировки, предускоритель-группирователь, первую регулярную ускоряющую структуру, клистрон CANON E3730A с волноводным трактом, систему диагностики, магнитную систему, систему синхронизации. Схема стенда ЛИНАК-20 приведена на рисунке 6.

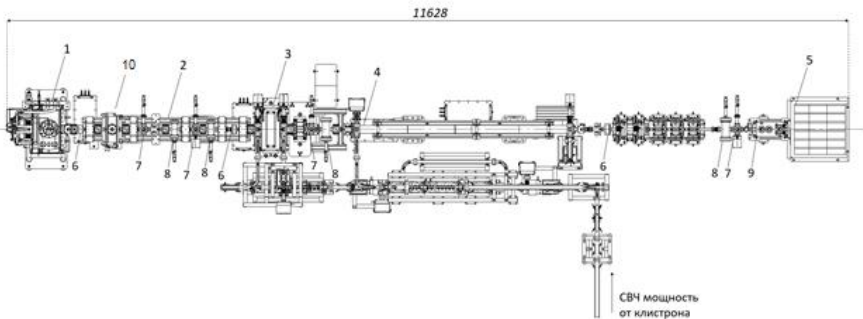


Рисунок 6 - Схема ускорительного стенда: 1 – ВЧ пушка, 2 – канал группировки, 3 – предускоритель-группирователь, 4 – регулярная ускоряющая структура, 5 – цилиндр Фарадея в радиационной защите, 6 – датчик тока пучка, 7 – люминофорные датчики, 8 – черенковские датчики, 9 – магнитный спектрометр, 10 – резонатор третьей гармоники

В параграфе 6.2 приводятся измерения и исследование параметров пучка, достигнутые при работе со стендом ЛИНАК-20.

При напряжении смещения катодного напряжения после ВЧ пушки -70 В был получен заряд 0.75 нКл. Измеренный нормализованный эмиттанс пучка после пушки составил 10.9 мм·мрад. Средняя энергия частиц при входной ВЧ мощности пушки 320 кВт равна 0.6 МэВ [28]. Было показано, что в зависимости от фазы инжекции длительность пучка после ВЧ пушки меняется. Были измерены значения длины пучка на полуширине с помощью черенковского датчика и стрик-камеры от 100 пс до 400 пс в зависимости от фазы инжекции. При дальнейшем увеличении фазы инжекции было замечено, что пучок снова укорачивается, что противоречило физике группировки пучка. Объяснением этого является тот факт, что в данном случае энергия некоторых частиц становится меньше пороговой энергии диагностики черенковского датчика и значительная часть пучка не попадала в измерения.

При работе с предускорителем-группирователем и первой регулярной ускоряющей структурой без использования резонатора канала группировки было получено токопрохождение пучка 70%, а энергия 30 МэВ при СВЧ мощности клистрона 20 МВт. Включение резонатора канала группировки позволило дополнительно сгруппировать пучок до 40 пс (ширина на полувысоте) в месте расположения второго черенковского датчика промежутка дрейфа (см. рисунок 6). В итоге был получен одногустковый режим работы ускорителя с токопроходом 100%. При этом после предускорителя-группирователя измеренная длительность пучка составила 18 пс, а после регулярной ускоряющей структуры – 19 пс (ширина на полувысоте). Благодаря уменьшению энергетического разброса до 1.1% (среднеквадратичное значение) в пучке значение средней энергии в конце ускорителя было уточнено и составило 34 МэВ при мощности клистрона 20 МВт, что соответствует расчету.

При работе с СВЧ мощностью клистрона было обнаружено, что между предускорителем-группирователем и регулярной ускоряющей структурой мощность распределяется 1:8, а 10% отражается обратно в клистрон. Данный аргумент не позволил поднять мощность клистрона до номинального значения 50 МВт из-за опасения влияния отраженной СВЧ мощности на работу клистрона. Причиной такого распределения мощностей стала дополнительная реактивная составляющая волноводного тракта, связанная с неидеальным согласованием ускоряющих структур, что не было предусмотрено при проектировании 7 дБ-го ответвителя для разделения СВЧ мощностей между предускорителем-группирователем и регулярной ускоряющей структурой. Дальнейшая работа с волноводным трактом позволила скомпенсировать дополнительную реактивность с помощью механического фазовращателя регулярной ускоряющей структуры. Это позволило поднять выходную мощность клистрона до 30 МВт и добиться также одногусткового режима ускорения с током прохождения 100%. Дальнейшее увеличение мощности

клистрона не произошло из-за ограниченного времени работы стенда и необходимости тренировки СВЧ элементов ускорителя. По той же причине была ограничена длительность импульса СВЧ клистрона, что позволило ускорить 38 сгустков вместо 55. В итоге параметры пучка, полученные на стенде, приведены в таблице 7 [24].

Таблица 7 - Полученные параметры пучка на стенде ЛИНАК-20

СВЧ мощность клистрона	30 МВт
Энергия пучка	$39 \pm 0.5\%$ МэВ
Среднеквадратичный энергетический разброс	1.1%
Нормализованный поперечный эмиттанс	40 мкм
Длительность пучка на полувысоте	20 пс
Заряд в сгустке	0.3 ± 1 нКл
Количество ускоренных сгустков	38

В параграфе 6.3 приведено заключение к Главе 6.

В Заключении представлены основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Линейный ускоритель инжектора ЦКП «СКИФ» формирует и задает начальные свойства инжектируемого электронного пучка, который становится в циклическом накопителе источником синхротронного излучения. Несмотря на то, что при реализации линейного ускорителя мы опирались на имеющийся международный опыт, многие подходы и решения являются оригинальными и уникальными. Стоит отметить, что линейные ускорители подобного типа и масштаба в России последний раз изготавливались более 20 лет тому назад. За это время многие подходы конструирования подобных ускорителей в значительной мере утрачены или стали неактуальны из-за развития новых технологий. Кроме того, при реализации проекта пришлось быстро решать задачи, которые не планировались в начале проектирования ЦКП «СКИФ». В первую очередь речь идет о создании клистронного усилителя с выходной импульсной СВЧ мощностью 50 МВт.

При создании линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» были решены все поставленные задачи. Самая сложная часть ускорителя, заключающаяся в получении пучка, его первоначальном формировании и ускорении, была реализована на стенде. Работа со стендом подтвердила

правильность выбранных решений и работоспособность разработанной схемы ускорителя. В результате описанной работы, кроме собственно разработки линейного ускорителя ЦКП «СКИФ», были получены знания, связанный с процессом захвата частиц в режим ускорения в ускоряющих структурах на основе диафрагмированных волноводов, что позволило поэтапно определить необходимые параметры пучка и элементы ускорителя для их достижения. Разработанный анализ учета ошибок изготовления ускоряющих структур позволил определить степень их влияния на ускоренный пучок и разработать критерии для снижения их отрицательного воздействия. Разработанная модель работы клистрона обеспечила не только его создание, но и возможность быстрого анализа процессов, связанных с его работой и выводом на рабочие параметры. Кроме этого сформированы технологические процессы, приобретены компетенции и опыт по созданию электронных пушек, ускоряющих структур, резонаторов группировки пучка, регулярных ускоряющих структур и структур предускорения, которые могут быть востребованы при реализации других подобных проектов в России. Создано большое количество вспомогательных, но необходимых, элементов, компонентов и узлов пучковой диагностики, управления ускорителем, магнитной, вакуумной систем и т.д. Отдельно стоит отметить, что была решена одна из самых острых задач – создание источника СВЧ мощности для ускоряющих структур – клистрона. На данный момент изготовлены все клистроны, необходимые для работы линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Таким образом, в качестве основных результатов диссертации можно перечислить:

1. Разработаны концепция и схема линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», сформулированы принципы его создания, запуска, настройки и эксплуатации.
2. Выработаны основные конструктивные решения, как всего линейного ускорителя, так и его отдельных систем и узлов.
3. Проведено исследование возможности и условий достижения проектных параметров пучка с учетом выбранной схемы ускорителя и его систем.
4. Проведен цикл расчетов (аналитических и численных) динамики пучка, оценено влияние возможных погрешностей выставки, изготовления, настройки и работы элементов ускорителя на параметры пучка.
5. Разработаны методические подходы к созданию элементов ускорителя, включая ускоряющие структуры и клистроны.
6. Разработаны подходы и созданы измерительные стенды для испытания и настройки элементов линейного ускорителя.

7. Создан стенд ЛИНАК-20, который является начальной секцией линейного ускорителя и включает в себя критически важные элементы ускорителя, влияющие на дальнейшее ускорение пучка: источник электронов, канал группировки, предускоритель-группирователь и первая регулярная ускоряющая структура. Проведенные на стенде эксперименты подтвердили работоспособность концепции и позволили получить необходимые параметры пучка.

Создан первый отечественный СВЧ клистрон с импульсной выходной мощностью 50 МВт на частоту 2856 МГц. Проектные параметры клистрона подтверждены экспериментально. По результатам создания первого клистрона были изготовлены дополнительно два клистрона с выходной СВЧ мощностью в районе 60 МВт.

Цитированная литература

1. Фетисов Г. В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. / Под ред. Л. А. Асланова – Москва : ФИЗМАЛИТ, 2007. 672 с. – Текст : непосредственный
2. Margaritondo G. Synchrotron light science: from flux to brightness to coherence. – Текст : непосредственный // *Nuovo Cimento D* – July 1998 – Т.20 – С.1083-1089.
3. Информационный портал по источникам СИ: [сайт]. – URL: <https://lightsources.org/>
4. Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»). / Бухтияров А. В. [и др.] – Текст : непосредственный // *Кристаллография*. – 2022 – Т. 67 – № 5 – С. 742-765.
5. Оптимизация магнитной структуры источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ в Новосибирске. / Баранов Г. Н. [и др.] – Текст : электронный // *Сибирский физический журнал*. – 2020 – Т.15 – № 1 – С. 5. – URL: https://journals.nsu.ru/files/sjp/2020/1/0699_SJP_2020T15V1_p05_p23.pdf. – Дата обращения 01.10.2024.
6. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk. / G. Baranov [и др.]. – Текст : электронный // *Physical Review Accelerators and Beams*. 2021. V. 24, № 12. С. 120704. – URL: <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704>. – Дата публикации 28.12.2021.
7. Results of NSLS-II linac commissioning. / Fliiller R.P. [и др.]. – Текст : электронный // *Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC2013 – 2013 – Shanghai, China*. – WEPWA083 – С. 2301-2303. – URL:

- <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2013/papers/wepwa083.pdf>. – Дата обращения 10.09.2024.
8. Ma H., Rose J., Sorrentino C. Radio frequency system of NSLS-II injector LINAC for multi-bunch-mode beams. – Текст : электронный // 5th North American Particle Accel. Conf. NAPAC2022. – Albuquerque, NM, USA. – JACoW Publishing. – ISBN: 978-3-95450-232-5. ISSN: 2673-7000. – С. 813-815. – URL: <https://inspirehep.net/files/a55a523d32cec2546aac9c103352f4d9>. – Дата обращения 10.10.2024.
 9. New preinjector for the ESRF booster. / Perron T. [и др.] – Текст : электронный // Proceedings of European Particle Accelerator Conference EPAC08. – 2008 – Genoa, Italy – WEP087 – С. 2195-2197. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e08/papers/wepc087.pdf>. – Дата обращения 10.10.2024.
 10. Описание ускорительного комплекса Европейского источника СИ ESRF EBS: [сайт]. – URL: <https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/Accelerators/the-accelerator-complex.html>
 11. Detailed design report on the MAX IV facility: [сайт]. // <https://www.maxiv.lu.se/beamlines-accelerators/accelerators/accelerator-documentation-2> – Дата обращения 10.10.2024.
 12. SLED: A Method of doubling SLAC's Energy. / Farkas Z. D. [и др.] – Текст : электронный // Proc. 9th International Conference on High Energy Accelerators. – Stanford University, California. – 1974 – С. 576-583. – URL: <https://s3.cern.ch/inspire-prod-files-0/068ed22dae5ba0bab8bcf19f9dcac092> – Дата обращения 10.10.2024.
 13. Д. А. Никифоров, А. Е. Левичев, Н. Абед. Разработка источников электронов для современных и будущих источников СИ и коллайдеров в ИЯФ СО РАН. – Текст : электронный // Письма ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 55, №4. – С. 1304-13.17. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan/v-55-4/87_Nikifirov_r.pdf. – Дата обращения 20.11.2024
 14. Инжекционная система для сибирского кольцевого источника фотонов / С. М. Гуров [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №7. – С.3-7. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S1028096020060072>. – Дата обращения 01.11.2024
 15. Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector. / Andrianov A. [и др.] – Текст : электронный // *Journal of Instrumentation*. – 2022 – V. 17. – T02009. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/02/T02009>. – Дата публикации 28.02.2022
 16. Дронова Е. В., Левичев А. Е., Андрианов А. В. Анализ передачи мощности от генератора в пучок для ускоряющих структур разных типов. – Текст : непосредственный // Письма в ЭЧАЯ. – 2021. – Т. 18.

- № 5(237). – С. 492–50. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2021_5/08_Dronova.pdf. – Дата обращения 06.10.2024
17. О влиянии смещения рабочей частоты на эффективность ускоряющей структуры ускорителя ЛУЭ-200. / Левичев А. Е. [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 21. – № 3(254). – С. 557–563. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_3/39_Levichev_r.pdf. – Дата обращения 22.10.2024
 18. Levichev A., Arsenteyeva M., Grishina K. Beam energy spectra in the presence of cell-to-cell phase advance errors. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2024. – V. 19. – T09001. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/T09001>. – Дата публикации 02.09.2024
 19. Arsenteyeva M. V., Berdnikov K. N., Levichev A. E. Analysis of the particle longitudinal motion during the injection process into the disk loaded traveling wave accelerating structure. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2020 – V. 15. – P10015. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/10/P10015/pdf>. – Дата публикации 16.10.2020
 20. Results of manufacturing and operation of the first accelerating structures for the linear accelerator of the SKIF injector based on a disk-loaded waveguide. – Текст : электронный / Levichev A. [и др.]. // [Journal of Instrumentation](https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/07/T07001). – 2023. – V.18. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001>. – Дата публикации 03.07.2023
 21. Вакуумное СВЧ-окно S-диапазона для мощного клистрона / А. М. Барняков [и др.] – Текст : электронный // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 2. – с. 72–77. URL: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S003281621802012X>. – Дата обращения 22.10.2022
 22. Разработка клистрона S-диапазона. / А. В. Андрианов [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ – 2020. – Т. 17, № 4(229). – С. 580–586. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_4/32_Andrianov_2.pdf. – Дата обращения 15.02.2023
 23. Development and testing of a high-power S-band klystron at BINP SB RAS. / Levichev A. [и др.] – Текст : электронный // Nuclear Science and Techniques. – 2024. – V. 35. – No. 7. – С. 1-10. – DOI: [10.1007/s41365-024-01471-9](https://doi.org/10.1007/s41365-024-01471-9)
 24. Результаты работы стенда линейного ускорителя СКИФ. / Арсентьева М. В. [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 21 – № 3(254). – С. 334–341. – URL:

http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_3/11_Arsentyeva_r.pdf. –

Дата обращения 04.10.2024

25. Термокатодная высокочастотная пушка и группирующий резонатор для инжектора синхротрона СКИФ / Волков В.Н. [и др.]. – Текст : электронный // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – Вып. 6. – С. 924-933. – URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/58133>. – Дата обращения 26.11.2024
26. Статус магнитных элементов инжектора СКИФ. / Павлюченко В. А. [и др.] – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2024 – Т. 19(1). – С.43-53. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53>. – Дата обращения 06.11.2024
27. Кацман Ю. А. Приборы сверхвысоких частот. – Текст : непосредственный / Высшая школа. Москва:–1974. – Т.2. – С. 96-171.
28. Измерение параметров ВЧ-пушки линейного ускорителя Сибирского кольцевого источника фотонов. / Ма С. [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2023. – Т. 18. – № 1. – С.14-27. – DOI: [10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27](https://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27). – Дата обращения 04.10.2024

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях перечня ВАК:

1. [A1] Вакуумное СВЧ-окно S-диапазона для мощного клистрона / А. М. Барняков [и др.] – Текст : электронный // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 2. – с. 72–77. URL: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S003281621802012X>. – Дата обращения 22.10.2022
2. [A2] Д. А. Никифоров, А. Е. Левичев, Н. Абед. Разработка источников электронов для современных и будущих источников СИ и коллайдеров в ИЯФ СО РАН. – Текст : электронный // Письма ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 55, №4. – С. 1304-13.17. URL: http://www1.jinr.ru/Pepan/v-55-4/87_Nikifirov_r.pdf. – Дата обращения 20.11.2024
3. [A3] Разработка клистрона S-диапазона. / А. В. Андрианов [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ – 2020. – Т. 17, № 4(229). – С. 580–586. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_4/32_Andrianov_2.pdf. – Дата обращения 15.02.2023
4. [A4] Инжекционная система для сибирского кольцевого источника фотонов / С. М. Гуров [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №7. – С.3-7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S1028096020060072>. – Дата обращения 01.11.2024
5. [A5] Дронова Е. В., Левичев А. Е., Андрианов А. В. Анализ передачи мощности от генератора в пучок для ускоряющих структур разных типов. – Текст : непосредственный // Письма в ЭЧАЯ. – 2021. – Т. 18.

- № 5(237). – С. 492–50. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2021_5/08_Dronova.pdf. – Дата обращения 04.06.2024
6. [A6] Results of manufacturing and operation of the first accelerating structures for the linear accelerator of the SKIF injector based on a disk-loaded waveguide. – Текст : электронный / Levichev A. [и др.]. // [Journal of Instrumentation](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001). – 2023. – V.18. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001>. – Дата публикации 03.07.2023
 7. [A7] Development and testing of a high-power S-band klystron at BINP SB RAS. / Levichev A. [и др.] – Текст : электронный // Nuclear Science and Techniques. – 2024. – V. 35. – No. 7. – С. 1-10. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41365-024-01471-9>. – Дата публикации 10.07.2024
 8. [A8] Результаты работы стенда линейного ускорителя SKIF. / Арсентьева М. В. [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 21 – № 3(254). – С. 334–341. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_3/11_Arsentyeva_r.pdf. – Дата обращения 04.10.2024
 9. [A9] О влиянии смещения рабочей частоты на эффективность ускоряющей структуры ускорителя ЛУЭ-200. / Левичев А. Е. [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 21. – № 3(254). – С. 557–563. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_3/39_Levichev_r.pdf. – Дата обращения 22.10.2024
 10. [A10] Levichev A., Arsentyeva M., Grishina K. Beam energy spectra in the presence of cell-to-cell phase advance errors. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2024. – V. 19. – T09001. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/T09001>. – Дата публикации 02.09.2024
 11. [A11] Arsentyeva M. V., Berdnikov K. N., Levichev A. E. Analysis of the particle longitudinal motion during the injection process into the disk loaded traveling wave accelerating structure. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2020 – V. 15. – P10015. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/10/P10015/pdf>. – Дата публикации 16.10.2020
 12. [A12] Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector. / Andrianov A. [и др.] – Текст : электронный // *Journal of Instrumentation*. – 2022 – V. 17. – T02009. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/02/T02009>. – Дата публикации 28.02.2022

Левичев Алексей Евгеньевич

**Разработка и экспериментальная проверка концепции линейного
ускорителя электронов – инжектора источника четвертого
поколения ЦКП «СКИФ»**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 21.04.2025.

Подписано в печать 22.04.2025.

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №4

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