



Федеральное государственное бюджетное учреждение
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123182
тел.: +7 499 196-95-39, эл. почта: nrcki@nrcki.ru

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор
НИИ «Курчатовский институт»
д.ф.-м.п., чл.-корр. РАН
Ю.А. Дьякова
2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный
исследовательский центр «Курчатовский институт»
на диссертацию

Левичева Алексея Евгеньевича

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

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц, и ускорительная техника в диссертационный совет 24.1.162.02, созданный на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Актуальность исследования

Диссертационная работа Левичева Алексея Евгеньевича посвящена созданию линейного укорителя для инжекционного комплекса центра коллективного пользования Сибирский Источник Кольцевых Фотонов (ЦКП «СКИФ»), включая мощный клистрон-усилитель и другие системы. Данный комплекс является источником

синхротронного излучения (СИ) поколения 4+ и создается на территории наукограда Кольцово Новосибирской области.

ЦКП «СКИФ» включает в себя линейный ускоритель электронов с энергией 200 МэВ, промежуточный синхротрон-бустер и накопительное кольцо с энергией 3 ГэВ. В работе приводится расчет линейного ускорителя, описана разработка его систем, а также приводится описание работы стенда, который представляет собой начальную часть линейного ускорителя от источника электронов до первой регулярной ускоряющей секции включительно. На основе результатов работы стенда приведены измеренные характеристики полученного пучка, что подтверждает адекватность выбранных решений при создании линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ». Для обеспечения питания ускоряющих структур сверхвысокочастотной (СВЧ) мощностью описан разработанный клистрон и приведены его измерения. Данная разработка позволила отказаться от импортных клистронов, которые перестали быть доступны в Российской Федерации. Необходимые параметры клистрона были продемонстрированы на созданном стенде. Поскольку источник СИ четвертого поколения создается в России впервые, то разработка для него линейного ускорителя является важной и актуальной задачей. Кроме этого создание собственного клистрона для питания ускоряющих секций и возможность отказа от импортных поставок и технологий также является необходимой и актуальной задачей не только для работы линейного ускорителя ЦКП «СКИФ», но и для возможности создания новых установок с линейными СВЧ ускорителями с энергией электронов сотни мегаэлектрон-вольт.

Тема диссертации и содержание работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Автореферат в полной мере и корректно отражает содержание диссертации. Основные публикации автора по теме диссертации, список которых приведен в автореферате, корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

Научная новизна состоит в том, что, с одной стороны, для уменьшения времени проектирования в конструкции линейного ускорителя максимально использованы узлы, ранее разработанные и произведенные в Институте Ядерной Физики им. Г.И. Будкера Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИЯФ СО РАН), с другой стороны, имеются существенные изменения, основанные на накопленном опыте и эксплуатации линейных ускорителей. Среди таких нововведений можно указать следующие: разработанный и созданный клистрон с рабочей частотой 2856 МГц и импульсной СВЧ мощностью 50 МВт; схема линейного ускорителя с высокочастотной пушкой с катодно-сеточным узлом и модулятором управления током катода; разработанный и созданный стенд, который включает в себя начальную часть линейного ускорителя до первой регулярной ускоряющей структуры включительно; результаты работы данного стенда, измеренные параметры ускоренного пучка и демонстрация работоспособности принятых и использованных решений при создании линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ».

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 203 страницы.

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

Первая глава посвящена общему описанию линейного ускорителя инжектора, приведена схема всего комплекса ЦКП «СКИФ», а также линейного ускорителя. Описаны все элементы линейного ускорителя и приведены их ожидаемые параметры и характеристики.

Вторая глава посвящена моделированию и оптимизации пучка в линейном ускорителе. Приводится анализ захвата электронов в режим ускорения. Описано моделирование ВЧ пушки с катодно-сеточным узлом, а также моделирование динамики пучка с зарядами 0.3 нКл и 1 нКл. Приводится аналитический расчет распределений амплитуд электрических полей в ускоряющих структурах и делается вывод о необходимых значениях СВЧ мощностей для предускорителя-группирователя и первой регулярной ускоряющей структуры исходя из полученных ранее амплитуд ускоряющих полей. Приведено моделирование динамики частиц во всем линейном ускорителе без учета и с учетом нагрузки током пучка ускоряющего поля. Даны расчетные модели и полученные параметры магнитных элементов ускорителя, необходимые для обеспечения расчетной динамики частиц.

Третья глава посвящена требованиям на изготовление ускоряющих структур. Здесь приводится вывод изменения фазы рабочего вида колебания в зависимости от размеров одной ускоряющей ячейки периодичности, анализируется влияние изменения частоты источника СВЧ мощности для регулярных ускоряющих структур с точки зрения набора энергии пучком, приводится статистический анализ влияния изменения фазы ускоряющей волны на элементе периодичности диафрагмированного волновода на выходную энергию и энергетический разброс в пучке.

Четвертая глава посвящена изготовлению элементов ускорителя. Приводится описание изготовления ВЧ пушки, резонатора канала группировки, магнитных элементов ускорителя, а также процесса изготовления и измерения ускоряющих структур, обсуждаются измеренные их параметры. Приводятся результаты изготовления некоторых других элементов ускорителя, включая элементы диагностики, термостабилизации, волноводного тракта и пр.

В Пятой главе дано описание расчета и изготовления клистрона. Описаны расчеты катодного узла клистрона, поперечной динамики пучка, определено необходимое распределение магнитного поля от катушек с током внутри соленоида клистрона. Приведен расчет возбуждающего резонатора, предварительный аналитический расчет системы группировки и результаты численных моделирований коэффициента усиления и полосы клистрона. Дается описание процесса изготовления клистрона и стенда, на котором получены и измерены выходные характеристики клистрона. Приведены измеренные вольтамперные и мощностные параметры. Кроме этого упоминается изготовленный

следующий клистрон, который непосредственно предназначен для работы на линейном ускорителе инжектора ЦКП «СКИФ».

Шестая глава посвящена работе стенда линейного ускорителя ЛИНАК-20. Здесь приведена схема и описание стенда ЛИНАК-20, который является начальной частью линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» до второй регулярной ускоряющей структуры. Приводятся измерения и исследование параметров пучка, достигнутые при работе со стендом ЛИНАК-20. Исследована ВЧ пушка, измерена энергия пучка на выходе пушки, эмиттанс и длительность пучка. Далее описан процесс ускорения пучка в регулярной ускоряющей структуре, а также процесс его группировки и достижения одногусткового режима работы. В таком режиме приведены измерения длительности пучка, заряда, энергии, энергетического разброса и эмиттанса. Также приведены аналогичные измерения для многоструктурного режима, который состоял из 38 ускоренных густков.

В Заключении представлены основные результаты работы и делается вывод о работоспособности всего ускорителя с полной энергией 200 МэВ инжектора ЦКП «СКИФ».

В ходе работы автором получены следующие основные результаты:

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.

Научная и практическая значимость результатов

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 клистрона для питания ускоряющих структур.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждается корректным использованием аналитических методов, программ и методов математического моделирования, а также различными экспериментальными измерениями на созданных стендах, включая стенд с ускоренным пучком и работающим клистроном.

Также работа прошла апробацию на различных международных научных конференциях по ускорителям заряженных частиц, семинарах в ведущих ускорительных центрах, рабочих совещаниях по созданию комплекса ЦКП «СКИФ». Результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

Личный вклад автора состоит в следующем. Под руководством автора разработан весь линейный ускоритель инжектора ЦКП «СКИФ». Им были утверждены концептуальные и технические решения, включая конструкцию линейного ускорителя и его основных систем. Под его руководством выбраны технологические решения и изготовлены базовые элементы линейного ускорителя. Автором полностью был исследован клистрон. Под его руководством был сконструирован клистрон и выработана технология его изготовления. Под руководством автора был создан стенд с полномасштабным макетом клистрона. На этом стенде были экспериментально изучены и оптимизированы параметры клистрона. В частности, были настроены частотные характеристики резонаторов клистрона, получены и измерены его выходные характеристики. Под руководством автора был запущен стенд на основе линейного ускорителя ЛИНАК-20, получен пучок электронов, измерены его параметры.

Работа не лишена некоторых недостатков:

1. Во Введение, при описании источников синхротронного излучения четвертого поколения, не упоминается бразильский источник SIRIUS, который так же

- в качестве инжектора имеет линейный ускоритель с энергией 150 МэВ и бустерный синхротрон с энергией до 3 ГэВ. Для полноты картины было бы правильней привести и этот источник наравне с европейскими и американским.
2. В Главе 2 приводится аналитическое обоснование процесса захвата в режим ускорения, а также процесс группировки. В этой же главе так же приводится численное моделирование динамики пучка в линейном ускорителе. Можно было бы уделить больше внимания сравнению аналитических результатов с численными.
 3. При анализе захвата пучка в режим ускорения в Главе 2 не рассматривается влияние пространственного заряда на процесс группировки, особенно при малой энергии инжекции в районе 0.7 МэВ.
 4. При моделировании динамики пучка в Главе 2 приводится аналитическое описание влияния нагрузки током пучка на ускоряющее поле, однако нет численных моделирований.
 5. В Главе 5 при описании изготовленного клистрона не приводится анализ стабильности его работы, особенно фазовой стабильности как долгосрочной, так и в течение СВЧ импульса. Однако данные параметры могут существенно влиять на процесс ускорения пучка.

Отмеченные замечания не снижают, однако, научной значимости и практической ценности работы.

Заключение

Диссертация А. Е. Левичева представляет собой законченную научную работу, направленную на развитие инжекторов на основе линейных СВЧ ускорителей, включая источники СВЧ мощности для ускоряющих структур. Разработанная концепция ускорителя, созданные его элементы, разработанные стенды и полученные на данных стендах результаты подтверждают работоспособность заложенных идей и решений.

Результаты, полученные в диссертации, разработанные новые технологии и устройства могут быть рекомендованы при создании других подобных проектов с использованием линейных СВЧ ускорителей. В качестве организаций, где могут быть востребованы описанные в диссертации результаты и опыт, можно перечислить: ИЯФ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, РФЯЦ ВНИИЭФ и другие организации, разрабатывающие ускорители заряженных частиц, в том числе и в зарубежных ускорительных центрах.

В целом по актуальности, новизне, научной и практической значимости диссертация А. Е. Левичева «Разработка и экспериментальная проверка концепции линейного ускорителя электронов – инжектора источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Левичев Алексей Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц

и ускорительная техника за развитие линейных СВЧ ускорителей для инжекционных комплексов различных ускорительных проектов.

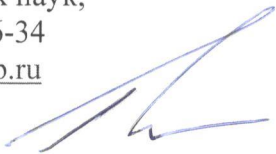
Отзыв составил:

Заместитель руководителя Комплекса по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам, ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт»

Доктор технических наук,

Тел. +7 (499) 789-66-34

e-mail: kulevoy@itep.ru



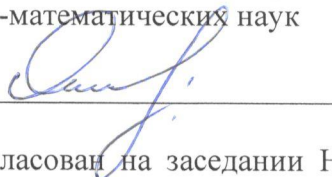
Кулевой Тимур Вячеславович

Диссертация А. Е. Левичева рассмотрена на открытом заседании семинара Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» “Экспериментальная физика высоких энергий, физика ускорителей заряженных частиц и физико-химические исследования материалов» (123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, тел. +7 (499) 196-95-39, nrcki@nrcki.ru, <http://nrcki.ru/>) 29 мая 2025 г. протокол № 17.

Руководитель семинара,

Руководитель ФВЭККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт»

Кандидат физико-математических наук



Акиндинов Александр Владимирович

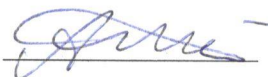
Отзыв согласован на заседании НТС Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт», протокол № 6 от 10 июня 2025г.

Председатель заседания НТС

Начальник Лаборатория физики слабых взаимодействий

ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт»

д.ф.-м.н.



Барабаш Александр Степанович

Секретарь заседания НТС

Ученый секретарь Комплекса, ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт»

к.ф.-м.н.



Васильев Валерий Васильевич

Подписи Т.В. Кулевого, А.В. Акиндинова, А.С. Барабаша, В.В. Васильева удостоверяю:
Заместитель директора - главный ученый секретарь

Алексеева Ольга Анатольевна

10 июня 2025 г.