

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

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

Диссертационная работа Левичева А.Е. посвящена разработке линейного ускорителя электронов на энергию 200 МэВ – инжектора источника синхротронного излучения 4-го поколения ЦКП «СКИФ». **Актуальность** избранной темы определяется важной ролью, которую играют источники синхротронного излучения в современных научных исследованиях и требованиями к увеличению их яркости.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Во **введении** описана актуальность темы исследования. Проведен анализ схем инжекции различных источников синхротронного излучения 3-го и 4-го поколений, показывающий степень разработанности темы исследования, на основании которого определен подход к созданию инжектора проекта ЦКП «СКИФ». Указаны цель диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Описаны методология и методы исследования; основные положения, выносимые на защиту; степень достоверности и апробация результатов; приведены ссылки на публикации, содержащие основные результаты диссертационной работы; отмечен личный вклад автора; указаны структура и объем диссертации.

В первой главе диссертационной работы дано описание источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ», принципов построения линейного ускорителя инжекционного комплекса и его основных элементов.

Источником электронов является ВЧ пушка, работающая на 16 субгармонике рабочей частоты линейного ускорителя, составляющей 2856 МГц, с сеточным управлением током катода, позволяющая формировать последовательность сгустков электронов с различной временной структурой с энергией около 0,7 МэВ и зарядом до 1 нКл. Выбранная энергия сгустков, с одной стороны, достаточно низка для осуществления их сжатия с помощью группирователя третьей гармоники за счет модуляции потока электронов по

скоростям. С другой стороны, эта энергия достаточно высока для последующего ускорения сгустков до энергии 3 МэВ с помощью предускорителя-группирователя на основе короткой регулярной ускоряющей структуры на бегущей волне с фазовой скоростью волны близкой к скорости света.

Первая глава также содержит описание секции регулярной ускоряющей структуры; системы СВЧ питания, в том числе элементов волноводного тракта; клистрона; магнитной оптики; системы диагностики, обеспечивающей измерение всех основных характеристик ускоренного пучка, а также контроль потерь тока пучка в процессе ускорения и транспортировки; вакуумной системы; системы охлаждения и термостабилизации.

Вторая глава посвящена аналитическим оценкам и численному моделированию динамики пучка в линейном ускорителе, в том числе в ВЧ пушке, канале группирования, предускорителе-группирователе и секциях регулярной ускоряющей структуры. Выполненный автором анализ уравнений движения электронов в поле бегущей волны ускоряющей структуры с постоянной фазовой скоростью близкой к скорости света, позволил определить оптимальное значение амплитуды ускоряющего поля для секции предускорителя-группирователя, 10 МВ/м при энергии инжекции 0,7 МэВ, и для регулярной ускоряющей структуры 20 МВ/м с энергией на входе 3 МэВ.

Расчет распределения поля ВЧ пушки осуществлялся с помощью программы CST. Численное моделирование динамики пучка, начиная с катода ВЧ пушки до выхода линейного ускорителя, проводилось с помощью программы ASTRA. Оценки энергетического разброса пучка, обусловленного нагрузкой током и переходными процессами были получены автором с помощью аналитических выражений.

Посредством численного моделирования динамики пучка автором определены допуски на точность установки элементов и на требуемую стабильность фаз ускоряющих полей элементов линейного ускорителя.

Помимо этого, вторая глава содержит результаты расчетов элементов магнитной оптики линейного ускорителя, включая, соленоиды, квадрупольные линзы, корректоры пучка.

В третьей главе диссертационной работы на основании соотношений, описывающих электродинамические характеристики диафрагмированного волновода и набор энергии электронами, автором сформулированы требования, предъявляемые к точности изготовлению ускоряющих структур, точности установки частоты задающего генератора, допустимому набегу фазы на ячейку, стабильности температуры структуры.

Четвертая глава диссертационной работы содержит описание результатов изготовления и измерения характеристик основных элементов линейного ускорителя: ВЧ пушки; резонатора группирователя; секций ускоряющих структур, включая предускоритель-группирователь и регулярную секцию; магнитооптических элементов; элементов волноводного тракта. Как указывает автор, выявленные отклонения отдельных параметров некоторых элементов не должны повлиять на выполнение требований к линейному ускорителю.

В **пятой главе** описаны результаты разработки источника СВЧ энергии линейного ускорителя – клистрона с выходной импульсной мощностью 50 МВт на частоте 2856 МГц, за основу которого был взят клистрон 5045 производства SLAC – такие клистроны эксплуатируются в ИЯФ СО РАН в инжекционном комплексе ВЭПП-5.

С помощью апробированных программ автором выполнены расчеты электронной пушки и динамики пучка в магнитном поле соленоида; с использованием эквивалентной схемы выполнен детальный анализ и выбор параметров входного резонатора клистрона; с использованием аналитического метода проведена оптимизация пассивных группирующих резонаторов и выходного резонатора. Результаты аналитических оценок были подтверждены посредством численного моделирования клистрона с использованием программы CST.

Дано описание экспериментального образца клистрона и результатов его испытаний, подтвердивших, с учетом погрешностей изготовления пушки, теоретические расчеты. Автор отмечает, что по результатам испытаний экспериментального образца к моменту написания диссертации были изготовлены два рабочих прибора, которые продемонстрировали превышение проектной мощности на 16%.

В **шестой главе** описан стенд линейного ускорителя, представляющий собой начальную часть ускорителя на энергию 200 МэВ, дополненную диагностической аппаратурой. Стенд включает в себя ВЧ пушку, группирователь, секцию предускорителя-группирователя и секцию регулярной ускоряющей структуры. Проектная энергия пучка на выходе стенда должна составлять 53 МэВ при питании одним клистроном с выходной СВЧ мощностью 50 МВт.

Приведены результаты измерения характеристик пучка (энергия, длительность сгустков, эмиттанс пучка) на различных этапах разработки систем стенда. В ходе выполнения диссертационной работы автору в полной мере не удалось достичь проектных параметров пучка ввиду ограничений по времени, связанных с необходимостью монтажа оборудования на месте размещения источника синхротронного излучения. Однако экстраполяция

результатов, полученных при выходной мощности клистрона 30 МВт, к проектной СВЧ мощности 50 МВт указывает на возможность достижения проектных параметров пучка.

В заключении диссертационной работы суммированы основные результаты.

Степень **обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, их **достоверность** определяются использованием апробированных методов и программных комплексов для аналитических расчетов и численного моделирования систем, входящих в состав ускорителя, динамики пучка; результатами измерений характеристик отдельных систем и параметров ускоренного пучка с помощью надежных методик, подтверждающими результаты расчета.

Научная новизна определяется совокупностью впервые полученных результатов расчетов, технологических решений, экспериментальных исследований, приведших к разработке инжектора источника синхротронного излучения 4-го поколения, в том числе к созданию клистрона, стенда, представляющего собой начальную часть линейного ускорителя, проведению экспериментов по ускорению пучка и измерению его характеристик.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что ее результаты могут быть использованы при создании инжекторов источников синхротронного излучения 4-го поколения, в том числе в проектах, которые в настоящее время разрабатываются в России. При существенном увеличении частоты следования импульсов (уменьшении скважности) начальная часть линейного ускорителя с энергией ускоренного пучка десятки МэВ может использоваться в качестве источника тормозного излучения в комплексах по наработке медицинских изотопов методом фотоядерных реакций.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в областях исследований: «Получение пучков заряженных частиц, расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков»; «Расчетно-теоретические аспекты формирования и транспортировки пучков заряженных частиц, создания ускорителей, накопителей, коллайдеров, систем охлаждения пучков тяжелых заряженных частиц»; «Исследования и расчеты динамики пучков заряженных частиц в линейных и кольцевых (циклических) ускорителях»; «Формирование и исследование магнитных и электрических полей, необходимых для ускорения и удержания пучков заряженных частиц», (пп. 1-4 паспорта специальности).

Апробация работы. Результаты работы были представлены автором на двух международных конференциях, двух рабочих совещаниях, опубликованы в 15 печатных и электронных работах, из них 12 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

По диссертационной работе могут быть сделаны следующие замечания.

1. Диссертационная работа в целом написана хорошим языком, но содержит отдельные неточности. Например, подпись к рисунку 2.1 «Случаи захвата частицы в ускоряющую структуру...». Наверное, следует писать «Случаи захвата частицы в режим ускорения...». Для этого же рисунка в тексте указано, что на нем представлены результаты для энергии инжекции 0,7 МэВ, в то же время в подписи к рисунку указаны два случая «...при любой энергии инжекции...». Аналогичное замечание относится к рисунку 2.6.

2. Часть рисунков содержит название осей и единиц измерения на английском языке, часть на русском. Идущие под одним номером пары рисунков не обозначены буквами, ссылки на них в подписи даются как «левый» и «правый», что усложняет описание рисунков в тексте и ссылки на них в данном отзыве.

3. Безусловно, важным достоинством работы является использование автором аналитических выражений при расчете динамики пучка в линейном ускорителе и при оптимизации резонаторов клистрона, сопровождающееся последующим численным моделированием. Однако результаты численного моделирования представлены в ограниченном объеме. Помимо приведенных автором результатов численного моделирования динамики пучка представляют интерес также продольные и поперечные фазовые портреты пучка на входе и выходе группирователя и входе и выходе предускорителя-группирователя, в том числе для сравнения с результатами аналитических оценок.

4. Рисунок 2.20. Левый рисунок: не вполне корректная подпись «...зависимость критического тока, который может пролететь через ускоряющую структуру без потери энергии на излучение ...». В таком виде подпись можно интерпретировать как утверждение отсутствия излучения пучка. В действительности, при любом токе пучка, пролетающего через ускоряющую структуру, имеет место излучение электромагнитного поля, которое в той или иной мере компенсируется электромагнитным полем внешнего источника СВЧ энергии. Правый рисунок: в подписи указано «...отношение максимального отклонения энергии, вызванного нагрузкой током пучка ускоряющего поля, к энергии электронов без учета тока пучка...». В тексте при описании этого рисунка это отношение названо «энергетическим

разбросом, вызванным током пучка». Необходимо пояснение того, как связаны между собой эти величины.

5. На странице 93 упоминается «ячейка связи» ускоряющей структуры. Не ясно, что это за ячейка в диафрагмированном волноводе. На странице 118 указано «Профиль отверстия диафрагмы имеет форму эллипса с соотношением осей 2:1.» Воспринимается так, как будто отверстие в диафрагме имеет эллиптическую форму. Может быть профиль края диафрагмы?

6. Клистрон. Стр. 128. При выборе тока луча клистрона равного 350 А в качестве аргумента указано то обстоятельство, что клистрон SLAC 5045 при падении тока с 400 А до 350 А продолжает выдавать достаточную, в том числе для данного проекта, СВЧ мощность. Падение тока клистрона неизбежно в процессе его эксплуатации, оно будет иметь место и у разработанного автором клистрона, однако при этом падение будет идти от уже более низкого значения, чем у клистрона 5045.

Отсутствуют данные о плотности тока эмиссии на поверхности катода. Эти данные представляют интерес, поскольку именно плотность тока эмиссии при малой роли циклических нагрузок определяет время жизни клистрона.

На упоминаемых автором рабочих приборах, созданных по результатам испытаний экспериментального образца, при микроперевансе $1,7 \text{ мкА/В}^{3/2}$, токе 330 А достигнутая СВЧ мощность составляет 58 МВт. Это соответствует весьма высокому кпд, около 52%, не типичному для приборов такого класса. Например, у клистрона SLAC 5045 кпд около 43%, у клистрона Cannon E3730A 39%. Необходимо пояснение: за счет чего удалось достичь столь высокого кпд клистрона, разработанного в рамках данной диссертационной работы.

7. Рисунок 6.15, правый. «Зеленая и синяя кривые – горизонтальное и вертикальное центральные сечения изображения». Во-первых, не понятно, почему единицы измерения для вертикального сечения пикосекунды. Во-вторых, на последующих рисунках такая же кривая называется аппаратной функцией стрик-камеры.

Сделанные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы, в которой впервые разработан линейный ускоритель – инжектор источника синхротронного излучения 4-го поколения ЦКП «СКИФ», и экспериментально подтверждена возможность достижения проектных параметров линейного ускорителя.

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Левичева А.Е. «Разработка и экспериментальная проверка концепции линейного ускорителя электронов –

инжектора источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ»» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Шведун В.И., даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Левичева Алексея Евгеньевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальностям 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики,
профессор, главный научный сотрудник Отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер

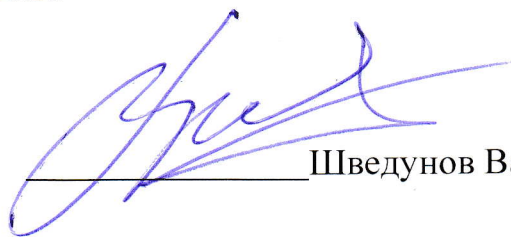
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Тел. +7 (499) 939-24-51

E-mail: shved@depni.sinp.msu.ru

2 июля 2025 г.



Шведун Василий Иванович

Подпись Шведун В.И. удостоверяю
Директор НИИЯФ МГУ, чл.-корр. РАН,
профессор



Боос Эдуард Эрнстович