

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

**МА СЯОЧАО**

на тему: «Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для источника синхротронного излучения СКИФ» по специальности 1.3.18.

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, представленную к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук.

**Актуальность работы.** В настоящее время одним из самых востребованных применений ускорительной техники является генерация синхротронного излучения. Использование синхротронного излучения для различных исследований в области материаловедения, биологии, медицины, для изучения окружающей среды, а также для некоторых технологических применений позволило совершить качественный общественно значимый скачок в развитии этих направлений. Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН сооружает источник синхротронного излучения СКИФ 4+ поколения с энергией 3 ГэВ и эмиттансом 75 пм·рад.

Диссертационная работа МА СЯОЧАО посвящена методам диагностики пучков электронов на этом источнике синхротронного излучения. Создание адекватных методов диагностики пучка в различных составляющих ускорительного комплекса (инжектор, электронно-оптические каналы, бустер) является важной задачей, решение которой всегда сталкивается с необходимостью адаптации известных методов диагностики под конкретные технические параметры данного ускорителя. Для этого требуется решение сложных технических и научных задач, даже если речь идет о хорошо известных методиках. Ускорителям следующего поколения требуются меньшие поперечные размеры и меньший эмиттанс пучка в сравнении с действующими установками. Поэтому требуется дальнейшее развитие существующих методов диагностики или разработка новых.

По мере совершенствования ускорителей заряженных частиц и общим улучшением характеристик пучка возрастают требования к точности измерений его параметров. Точность измерения сечения пучка была повышена с сотен микрон до текущего субнанометрового уровня, а точность определения длительности пучка также была улучшена до фемтосекундных значений. Ускорительная диагностика включает в себя большое разнообразие технических средств, однако каждый метод измерения имеет свои преимущества, недостатки и область применения. Необходимо применять методы диагностики, исходя из диапазона измерений и точности, которые реально удовлетворяют потребностям текущего эксперимента.

Проект Сибирского Кольцевого источника Фотонов (СКИФ) не имеет аналогов в России. Линейный ускоритель, являющийся частью инжекционного комплекса СКИФ, должен иметь параметры пучка, до сих



пор не реализованные на действующих в России установках. В связи со сказанным диагностический комплекс, предназначенный для получения таких параметров пучка, позволил успешно провести эксперименты по отладке линейного ускорителя на специально созданном для этого стенде, а исследования, проведенные МА СЯОЧАО являются актуальными и представляют научную ценность.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстративного материала, списка таблиц. Общий объем работы 160 страниц, из них 119 страниц текста, включая 128 рисунков и 22 таблицы. Библиография включает 86 наименований.

**В первой главе** обсуждаются проблемы диагностики пучков заряженных частиц на современных ускорителях. Представлены развитие и характеристики современных установок синхротронного излучения и линейных ускорителей, сформулированы параметры пучков, которые требуется измерять. Описаны основные методы диагностики пучка и их развитие, особенно относящиеся к теме данной диссертации. Характеризуется источник синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ.

**Вторая глава** посвящена вопросам проектирования системы диагностики пучка стенда линейного ускорителя СКИФ. В ней приводится описание люминофорного экрана для измерения поперечного размера пучка электронов. Дана характеристика его основных компонент и конструктивные решения, обеспечивающие необходимую точность управления положением экрана относительно оси вакуумной камеры. В этой же главе описан магнитный спектрометр, предназначенный для проведения измерений в широком диапазоне энергий. Приведены результаты измерения магнитного поля спектрометра и расчеты аппаратной функции спектрометра и профилей пучка для различных величин его энергии и энергетического разброса, ожидающихся в экспериментах. Исследовано возможное влияние на результаты измерений гамма-излучения, возникающего из-за взаимодействия электронного пучка с медным коллиматором на входе в спектрометр. Предложена вторая схема измерения энергии для обеспечения заданной точности при энергии пучка 200 МэВ. Результаты моделирования динамики пучка подтверждают возможности такой диагностической схемы.

Разработан черенковский датчик для измерения длительности пучка, проведено численное моделирование и спроектирована оптическая система.

Разработанная схема диагностики позволяет реализовать временное разрешение при измерениях длительности пучка в несколько пикосекунд.

Разработаны управляющие программы и программы визуализации результатов измерений на стенде линейного ускорителя СКИФ.

С помощью численного моделирования были определены материал и размеры цилиндра Фарадея, используемого для измерения заряда пучка и его поглощения.



**В третьей главе** представлены результаты измерений с использованием всех разработанных диагностических устройств на стенде линейного ускорителя. Описано размещение люминофорных экранов, с помощью которых измерялись поперечные размеры пучка, и проводилась настройка различных режимов работы ускорителя и проводка пучка. Приведены результаты измерений параметров пучка.

Показаны результаты измерения длительности пучка с помощью черенковского датчика в различных точках линейного ускорителя: после ВЧ пушки, в канале группировки, после предускорителя, и на выходе ускорителя. Эти измерения показаны как для многосгусткового пучка, так и для одиночного банча. Приведены измерения энергии пучка после ВЧ-пушки и его энергетический разброс.

**Четвертая глава** посвящена разработке и применению оптической диагностической системы бустера СКИФ для регистрации поперечных и продольных профилей пучка. Были рассчитаны спектры синхротронного излучения из поворотных магнитов бустера. Учитывая сходство ускорителя ВЭПП-3 с бустером, эта диагностика была протестирована на ВЭПП-3. Приведены результаты измерений поперечного размера пучка при его инжекции в ВЭПП-3.

**В Заключении** представлены основные результаты работы.

**Приложение А** содержит все результаты измерений магнитного поля магнитного спектрометра.

**Научная новизна работы.** Научная новизна представленной работы определяется реализацией, развитием и совершенствованием методов диагностики параметров ускоренных пучков электронов. Разработанный и изготовленный магнитный спектрометр обеспечивает высокий динамический диапазон диагностики (0,6-200 МэВ) при компактных размерах устройства. Магнитный спектрометр может измерять энергию пучка от 0,6 МэВ до 200 МэВ с точностью около 1%, а точность измерения энергетического разброса пучка составляет 10 - 15%. Временное разрешение черенковского датчика, используемого для регистрации профиля пучка, может достигать уровня 3-4 пикосекунд. Датчики применены для регистрации продольного профиля пучка в диапазоне от 0,6 МэВ до 30 МэВ. Оптическая система диагностики на синхротронном излучении способна регистрировать динамику поперечного профиля пучка в многокадровом режиме.

**Значимость полученных результатов для науки и практики.** Разработана система диагностики для линейного ускорителя СКИФ, которая может предоставлять пользователям информацию о параметрах пучка во время поэтапной отладки и регулярной эксплуатации. Эта диагностическая система соответствует требованиям долговременной стабильной работы и имеет достаточный динамический диапазон по току и энергии пучка. Разработана оптическая диагностика пучка в бустере ВЭПП-3, предназначенная для измерения поперечного и продольного профиля пучка во время рабочего цикла бустера. Прототип оптической диагностики бустера прошел испытания на ускорителе ВЭПП-3. Программное обеспечение диагностик,



разработанное и сертифицированное на национальном уровне, позволяет осуществлять контроль параметров пучка и обратную связь в режиме реального времени. Найденные технические решения могут быть применены на других ускорительных комплексах.

**Степень обоснованности, достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.** Основные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы МА СЯОЧАО обоснованы как результатами проведенного собственного исследования, так и общепринятыми концепциями современных диагностических систем на ускорителях. Теоретические аспекты также согласуются с выводами из экспериментальной части диссертации, по измерениям параметров пучка на стенде линейного ускорителя. Достоверность научных положений подтверждается апробацией результатов на двух международных конференциях и одной Всероссийской. О результатах работ по тематике диссертации автор докладывал на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН на секции «Физика ускорителей» в 2020 и 2022 гг.

По материалам диссертации опубликовано 6 работ, из них 3 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также 3 - в сборниках трудов конференций, получен патент на регистрацию программы для ЭВМ.

**Общая оценка работы и ее соответствие требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.** Диссертация МА СЯОЧАО представляет собой интересное и профессионально выполненное исследование, соответствующее статусу научно-квалификационного труда. Полученные в диссертационной работе данные отражены в 6 статьях в журналах, из них 3 в журналах, включённых в перечень ВАК при Минобрнауки России и рекомендованных для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата наук. Материалы диссертации докладывались на 3 научных конференциях всероссийского и международного значения, что говорит о должном уровне их апробации. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

#### **Вопросы и замечания по содержанию диссертации.**

Несмотря на достоинства диссертации, в ней имеются отдельные недочеты, однако, серьёзно не влияющие на общее благоприятное впечатление о работе.

1. В первой главе излишне подробно описаны свойства синхротронного излучения и его источники.
2. Не совсем определено сформулирован личный вклад автора в работу. Из текста следует, что вклад больше в написании публикаций, а не в разработке диагностических устройств и проведении измерений.
3. В работе присутствуют стилистические ошибки и опiski.

Сформулированные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. В целом выполненная работа превосходна, все защищаемые положения обоснованы.



**Заключение.** Диссертационная работа МА СЯОЧАО «Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для источника синхронного излучения СКИФ» является самостоятельным завершенным научным трудом, выполненным на высоком научном уровне, и вносит большой вклад в создание источника синхротронного излучения СКИФ.

По актуальности, новизне, научно-практической значимости и степени достоверности результатов диссертация полностью соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата технических наук, установленным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор, МА СЯОЧАО, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18, Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Кобец Валерий Васильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации МА СЯОЧАО и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент: Кобец Валерий Васильевич, начальник сектора № 3 Научно-экспериментального отдела теоретической и методической поддержки проектов Отделения №2 Физики на ускорительном комплексе Нуклотрон-Ника Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, кандидат технических наук, специальность 1.3.18. (01.04.20) Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

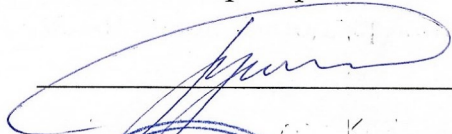
e-mail: [vkobets@jinr.ru](mailto:vkobets@jinr.ru) ; тел.: +7(925)275-70-29



/Кобец В.В./

29.11.2023 г.

Подпись Кобца В.В. подтверждаю,  
Ученый секретарь ЛФВЭ



/Чеплаков А.П./

