

**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**



**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКПО (National Classification of Enterprises and Organizations): 02069303,  
Company Number: 027000890168,  
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)  
7018007264/701701001, BIC 016902004

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
факс: +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 016902004

24.11.2023 № 09/2461  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. проректора по науке  
и стратегическим проектам

**ФГАОУ ВО**

«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,

И.Б. Степанов

» \_\_\_\_\_ 2023 года



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Ма Сяочао на тему «Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для источника синхротронного излучения СКИФ», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «1.3.18 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

#### **Актуальность темы.**

В настоящее время интерес к генерации электронных пучков высокой энергии обусловлен двумя направлениями развития ускорительной физики. Во-первых, это проекты по созданию линейных электрон-позитронных коллайдеров. Во-вторых, создание источников рентгеновского синхротронного излучения на основе накопительных колец. Данные ускорительные комплексы предъявляют повышенные требования к поперечным размерам и эмиттансу пучка в сравнении с действующими установками. Исследования Ма Сяочао

нацелены на разработку комплексной системы диагностики электронного пучка линейного ускорителя источника синхротронного излучения СКИФ для измерения основных параметров пучка на этапах от сборки и отладки до повседневной эксплуатации линейного ускорителя. Разработка и усовершенствование точных методов диагностики пучка являются важными задачами, решение которых всегда сталкивается с необходимостью адаптации хорошо известного диагностического метода под конкретные технические параметры данного ускорителя. Зачастую для этого требуется решение сложных технических и научных задач.

**Научная новизна** полученных в диссертационном исследовании результатов заключается в том, что был разработан и изготовлен компактный магнитный спектрометр, обеспечивающий высокий динамический диапазон измерения энергии электронного пучка от 0,6 МэВ до 200 МэВ с точностью до 1%, точность измерения энергетического разброса пучка составляет 10-15%. Было установлено, что временное разрешение черенковского детектора, используемого для регистрации продольного профиля электронного пучка в диапазоне энергий от 0,6 МэВ до 30 МэВ, может достигать величины 3-4 пикосекунд, а также было продемонстрировано, что оптическая система диагностики на основе синхротронного излучения способна регистрировать динамику поперечного профиля пучка в многокадровом режиме.

**Достоверность** представленных автором результатов подтверждается использованием известных и апробированных программных пакетов при проведении численного моделирования физических процессов взаимодействия пучка электронов с разрабатываемыми приборами, проведением экспериментальных исследований, результатами сравнения экспериментальных данных с расчетами. Результаты работы неоднократно докладывались на авторитетных международных конференциях по ускорительной физике и опубликованы в профильных научных изданиях.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в том, что разработана комплексная система диагностики электронного пучка для линейного ускорителя, являющегося инжектором источника синхротронного излучения СКИФ. Также разработана оптическая диагностика пучка в бустере

ВЭПП-3, предназначенная для измерения поперечного и продольного профиля пучка во время рабочего цикла бустера.

**Связь диссертации с реальным сектором экономики, научными проектами, программами и грантами.** Результаты диссертации использованы на линейном ускорителе, инжекторе источника синхротронного излучения СКИФ, и электрон-позитронном накопителе ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН.

**Личный вклад автора** состоит в построении математических моделей основных систем диагностики линейного ускорителя, проведении численных расчетов по разработанным моделям, проведении моделирования и анализа азимутального распределения потерь пучка основного накопителя СКИФ, планировании и подготовке экспериментальных исследований, участии во всех экспериментальных исследованиях, обработке и анализе экспериментальных данных, подготовке и написании статей.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстрированного материала, списка таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 160 страниц, 22 таблицы и 128 рисунков. Список литературы включает 88 наименований.

**Во введении** обоснована тема диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные защищаемые положения, а также сведения об опубликовании в периодических рецензируемых изданиях и апробации на профильных научных мероприятиях результатов диссертационной работы.

**Первая глава** диссертационного исследования посвящена актуальным проблемам диагностики электронного пучка на современных ускорителях. Представлена информация о свойствах синхротронного излучения и основных характеристиках современных источников рентгеновского синхротронного излучения. Сформулированы параметры пучка, которые требуют контроля. Приведен обзор основных методов диагностики пучка, применяемых на линейных ускорителях и источниках синхротронного излучения. Кратко дана информация об источнике синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ.



**Вторая глава** диссертационного исследования посвящена вопросам проектирования системы диагностики электронного пучка стенда линейного ускорителя – инжектора источника синхротронного излучения СКИФ. Автором разработана конструкция люминофорных экранов для диагностики поперечного профиля пучка, проведено численное моделирование магнитного спектрометра для измерения энергии и энергетического разброса электронного пучка, выполнено моделирование и разработка черенковского детектора, предназначенного для измерения продольного профиля пучка. С помощью численного моделирования были определены материал и размеры цилиндра Фарадея и уточнена схема расположения радиационной защиты.

**Третья глава** диссертационного исследования посвящена апробации разработанных приборов на стенде линейного ускорителя. Визуализация поперечного профиля и измерения эмиттанса пучка проводились с использованием люминофорных экранов, которые были размещены вдоль вакуумной камеры ускорителя за ВЧ пушкой, в канале группировки, за предускорителем и ускоряющей структурой. Точность измерения поперечных размеров пучка определялась точностью измерения координатной сетки и составляет 2%. Измеренные значения поперечных размеров и эмиттанса пучка хорошо согласуются с расчетными величинами. Измерение энергии и энергетического разброса пучка за ВЧ пушкой и после ускорителя-группирователя было выполнено с помощью магнитного спектрометра. Энергетическое разрешение магнитного спектрометра составило 1%. Продольный профиль электронного пучка был измерен с помощью черенковского детектора и стрик-камеры в различных точках линейного ускорителя. Измерения были выполнены как для одиночного сгустка, так и для последовательности сгустков. Наилучшее значение аппаратной функция было измерено на выходе из линейного ускорителя (2,8 пикосекунды). Для измерения заряда при низких энергиях из ВЧ пушки была применена высоковакуумная часть вывода ВЧ мощности в качестве цилиндра Фарадея.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена разработке оптической системы для диагностики поперечных и продольного размеров электронного пучка для бустера источника синхротронного излучения СКИФ. Поскольку время затухания бетатронных колебаний при инжекции в электрон-

позитронный накопитель ВЭПП-3 близко к длительности рабочего цикла бустера СКИФ, то апробация новой оптической схемы была проведена на ВЭПП-3. Автором также было разработано программное обеспечение для измерения поперечного профиля пучка

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

В представленном диссертационном исследовании можно отметить ряд недостатков:

1. В формулировке цели диссертационной работы используется термин «мониторинг», на наш взгляд он выбран не совсем удачно и не отображает всех функций диагностического комплекса.
2. На стр. 53 на рис. 2.21 не приведены ошибки измерений.
3. В разделе 2.3.4 на рисунках 2.36 и 2.37 отсутствует подпись к оси ординат.
4. Раздел 2.4 озаглавлен как «Черенковский датчик». На наш взгляд название выбрано некорректно, поскольку раздел посвящен выбору материала и конструктивным особенностям радиатора излучения Вавилова-Черенкова.
5. В разделе 4.1 автор приводит результаты расчетов спектров синхротронного излучения для разных значений энергии электронов и оценки выхода фотонов в оптической области спектра, но никак не комментирует полученные результаты. Автору следовало дать пояснения полученных оценок и убедиться, что они соответствуют критериям светочувствительности диссектора и оптической камеры.
6. Из текста диссертационной работы (глава 4) не совсем понятен метод измерения поперечных размеров электронного пучка на основе синхротронного излучения. Оптическая схема приведена на рис. 4.11, стр. 124. Будет ли размер пятна СИ соответствовать поперечному размеру сгустка? Не прописана процедура калибровки: пересчет пикселей в мм.
7. В третьей главе, раздел 3.1.3 отметим несогласованность в ошибках измерений. На стр. 92 в подписи к рис. 3.8. указано, что «Точность измерения размера (FWHM)  $\pm 5\%$ ». В подписи к рис. 3.7  $\sigma_x = 0.8 \pm 0.1$



(точность хуже 10%). На стр. 91 приведено измеренное значение эмиттанса  $\varepsilon_x = 40 \pm 0.3$  мм·мрад (точность лучше 1%).

8. Среди общих замечаний по работе следует отметить наличие ряда стилистических неудачных выражений, использование жаргонных терминов и опечаток по тексту, использование рисунков с подписями на английском языке.

**Заключение по диссертационной работе.** На основании вышеизложенного диссертационная работа Ма Сяочао по своей актуальности, научной новизне, уровню глубины проработки и приведённым результатам является законченной научно-квалификационной работой. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности «1.3.18 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника». Новые научные результаты, полученные соискателем, имеют существенное значение для развития систем диагностики параметров пучков заряженных частиц. Имеющиеся замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Ма Сяочао.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 6 работах, из них 3 работы – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 3 работ – в изданиях сборников конференций, получен один патент на регистрацию программы для ЭВМ.

Автореферат структурирован и в полном объеме отражает содержание рукописи диссертации.

Диссертация «Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для источника синхротронного излучения СКИФ» выполнена на высоком научном уровне, соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» постановления 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».

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на научном семинаре Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения

высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», протокол № 9 от 20 ноября 2023 года.

Председатель научного семинара,  
директор Исследовательской школы  
физики высокоэнергетических процессов  
д.т.н., доцент

  
Глушков Дмитрий Олегович

Секретарь научного семинара,  
начальник организационного отдела  
Исследовательской школы физики  
высокоэнергетических процессов

  
Покровская Елена Александровна


Профессор-консультант  
Исследовательской школы  
физики высокоэнергетических процессов  
д.ф.-м.н., профессор

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц  
[potylitsyn@tpu.ru](mailto:potylitsyn@tpu.ru), +7 (3822) 701777 Вн.т. 2275

  
Потылицын Александр Петрович

Старший научный сотрудник  
Инженерной школы ядерных технологий  
МНОЛ «Рентгеновская оптика»  
к.ф.-м.н.

Специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника  
[mvshev@tpu.ru](mailto:mvshev@tpu.ru), +7 (3822) 701777 Вн.т. 2321

  
Шевелев Михаил Викторович