

На правах рукописи

И + Ц

МА СЯОЧАО

РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ
ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СКИФ

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2023

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Мешков — доктор физико-математических наук,
Олег Игоревич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Кобец — кандидат технических наук, Международная
Валерий Васильевич — межправительственная организация
Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна, начальник сектора
линейных ускорителей.

Кулевой — доктор технических наук, Федеральное
Тимур Вячеславович — государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр
Курчатовский институт», г. Москва,
заместитель руководителя по прикладным
научным исследованиям и
экспериментальным установкам
Курчатовского комплекса теоретической и
экспериментальной физики.

ВЕДУЩАЯ — Федеральное государственное автономное
ОРГАНИЗАЦИЯ: образовательное учреждение высшего
образования Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск

Защита диссертации состоится «19» декабря 2023 г. в «16-30» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.01 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 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте https://inp.nsk.su/images/MaXiaochao_disser.pdf

Автореферат разослан « 08 » ноября 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  Л. И. Шехтман
доктор физ.-мат. наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Диагностика пучка является неотъемлемой и важной частью современных ускорительных систем. Ее основная функция заключается в измерении энергии, энергического разброса, эмиттанса, заряда, поперечного и продольного размеров пучка, контроля за этими параметрами при штатной работе установки, а также является незаменимым средством для изучения динамики пучка в ускорителе.

В последние и ближайшие десятилетия в центре внимания ускорительной физики находятся проекты линейных коллайдеров для экспериментов по физике высоких энергий (ILC, CLIC) и источники синхротронного излучения четвертого поколения (Euro-XFEL, LCLS, Spring 8-FEL, СКИФ). Этим ускорителям следующего поколения требуются меньшие поперечные размеры и меньший эмиттанс пучка в сравнении с действующими установками. Например, расчетный размер пучка в месте встречи ILC сравним с молекулой воды. В связи с этим требуется дальнейшее развитие существующих методов диагностики или разработка новых.

В составе сложных ускорительных комплексов всегда присутствуют отдельные составляющие, где параметры пучка не столь экстремальны, но, тем не менее, их знание необходимо для полноценного функционирования комплекса как целого. Поэтому создание адекватных методов диагностики пучка в разнообразных составляющих ускорительного комплекса (инжектор, электронно-оптические каналы, бустер) также является важной задачей, решение которой всегда сталкивается с необходимостью адаптации известного диагностического метода под конкретные технические параметры данного ускорителя. Зачастую для этого требуется решение сложных технических и научных задач, даже если речь идет о хорошо известных методиках.

Степень разработанности темы

С развитием технологии ускорителей, методика измерения параметров пучков также претерпела значительное развитие. По мере совершенствования ускорителей заряженных частиц и общим улучшением характеристик пучка возрастают требования к точности измерений его параметров. Например, 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 Российской Федерации установках. Диагностический комплекс, предназначенный для получения этих параметров, позволил успешно провести эксперименты по отладке линака на специально созданном для этого стенде.

Цели и задачи диссертационной работы

Основными целями данной работы являлись:

Разработка комплексной системы диагностики пучка линейного ускорителя СКИФ для решения задачи мониторинга пучка на этапах от сборки и отладки линейного ускорителя до повседневной эксплуатации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: Разработан, изготовлен и испытан в экспериментах на стенде магнитный спектрометр для измерения энергии и энергического разброса пучка. В соответствии с теоретической моделью выбрана базовая структура магнитного спектрометра, и ее параметры детализированы с помощью численного моделирования.

Для измерения продольного профиля пучка разработан и изготовлен черенковский датчик в нескольких модификациях. С помощью численного моделирования определены конструктивные параметры датчика для работы при различных энергиях и длительностях пучка линейного ускорителя. Датчик активно использовался в экспериментах с пучком на стенде линейного ускорителя.

Разработан и изготовлен в трех модификациях цилиндр Фарадея (ЦФ) как для измерения заряда пучка, так и для поглощения пучка при отладке режима работы линейного ускорителя. Проведено численное моделирование поглощения пучка и радиационного поля вокруг цилиндра для определения материала и размеров ЦФ, а также конструирования радиационной защиты.

Цилиндр Фарадея в двух модификациях регулярно применялся в экспериментах с пучком на стенде линейного ускорителя.

Разработана конструкция люминофорных датчиков линейного ускорителя. Датчики изготовлены в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН и использовались на постоянной основе для контроля поперечных размеров и положения пучка в экспериментах на стенде линейного ускорителя.

Разработана система оптической диагностики пучка для бустера СКИФ, основанная на синхротронном излучении из поворотного дипольного магнита, регистрирующая поперечный и продольный профили пучка.

Для прототипирования оптической диагностики бустера и отладки программного обеспечения были решены следующие задачи:

На ускорителе ВЭПП-3 установлена новая система оптической диагностики пучка. Написана программа для измерения поперечных размеров пучка, используемая при работе установки.

Научная новизна работы

1. 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%.

2. Временное разрешение черенковского датчика, используемого для регистрации профиля, может достигать уровня 3-4 пикосекунд. Датчики применены для регистрации продольного профиля пучка в диапазоне от 0,6 МэВ до 30 МэВ.

3. Оптическая система диагностики на синхротронном излучении способна регистрировать динамику поперечного профиля пучка в многокадровом режиме.

Теоретическая и практическая значимость работы

Линейный ускоритель СКИФ оснащен полным набором диагностических приборов, которые могут стабильно предоставлять пользователям информацию о параметрах пучка во время поэтапной отладки и регулярной эксплуатации. Эта диагностическая система соответствует требованиям долговременной стабильной работы с 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.

Методология и методы исследования

Методологическую основу диссертационного исследования составляет метод численного моделирования и экспериментального исследования. Для численного моделирования использовались метод Монте-Карло, коды FLUKA, ASTRA и ELEGANT, а обработка и анализ экспериментальных данных выполнялись с помощью программных пакетов Python и Matlab.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный и созданный диагностический комплекс линейного ускорителя СКИФ соответствует данным численного моделирования и позволяет измерять продольный и поперечный профиль, заряд, эмиттанс, энергию и энергетический разброс пучка электронов с энергией от 0.6 до 50 МэВ с точностью, удовлетворяющей требованиям эксперимента.

2. Параметры пучка электронов из ВЧ-пушки, после ускорителя-группирователя и после ускоряющей структуры, измеренные при помощи комплекса диагностик, соответствуют расчетным величинам.

3. Прототип системы оптической диагностики бустера СКИФ, апробированный на ускорителе ВЭПП-3, позволяет измерять динамику поперечного и продольного профиля пучка за время рабочего цикла бустера с помощью регистрации оптической части спектра синхротронного излучения.

4. Программное обеспечение диагностик, разработанное и сертифицированное на национальном уровне, позволяет осуществлять контроль параметров пучка и обратную связь в режиме реального времени.

5. Найденные технические решения могут быть с успехом применены на других ускорительных комплексах.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты работ, положенных в основу диссертации, докладывались на следующих конференциях:

1. The 12th International Particle Accelerator Conference (IPAC2021, May 2021, Кампинас, SP, Бразилия);
2. The 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC 2021, 27 September 2021, Alushta, Russian Federation);
3. Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD 2023, Мельбурн, Австралия, 12 апрель 2023).

О результатах научно-исследовательских работ по тематике диссертации автор докладывал на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН на секции «Физика ускорителей» в 2020 и 2022 гг.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 работ, из них 3 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК [1-3], а также 3 - в сборниках трудов конференций [4-6], получен патент на регистрацию программы для ЭВМ [7].

Личный вклад автора

В публикациях [1], [4], обсуждается возможность создания на линейном ускорителе СКИФ системы диагностики, включающей в себя люминофорные экраны, черенковские детекторы, магнитный спектрометр и цилиндр Фарадея. Автором были смоделированы и рассчитаны физические процессы взаимодействия пучка электронов с этими приборами, а рабочие параметры и конструкция приборов определены в соответствии с диагностическими требованиями линейного ускорителя. Другие соавторы участвовали в проектировании электроники и обсуждении результатов. Вклад автора в публикацию [1], [4] является определяющим. В статье [2] описано первое применение оборудования, созданного на основе работы [1]. Все результаты диагностики, упомянутые в статье [2], получены с помощью системы диагностики, разработанной в [1]. Автор участвовал в проведении экспериментов и занимался обработкой и анализом результатов и внес основополагающий вклад в публикацию [2]. В работах [3], [5] автор участвовал в проектировании системы регистрации потерь пучка основного кольцевого накопителя СКИФ. Автор, используя код FLUKA, провел полное моделирование и анализ азимутального распределения потерь пучка основного накопителя СКИФ. Были смоделированы потери пучка на одном суперпериоде магнитной структуры основного накопителя,

проанализированы различные типы потерь пучка и разработана система обнаружения потерь пучка на основе сцинтилляционных датчиков. В работе [6] автор участвовал в измерениях временных параметров импульсного излучения накопителя с помощью пикосекундной стрик-камеры. Была получена зависимость длины пучка от тока. Программный код для реализации функций, описанных в [7], полностью создан самим автором и является важной частью системы оптической диагностики бустера СКИФ. Вклад автора определяющий, соавтор обеспечивал научное руководство. Был получен патент о государственной регистрации программного обеспечения для записи профиля пучка в многокадровом режиме.

Автор освоил теоретические основы разработки приборов, построил и смоделировал математические модели диагностических устройств, протестировал и реализовал в экспериментах функционал разработанных приборов. В процессе разработки использовались программные пакеты Matlab, пакеты Python и код FLUKA для численного моделирования и обработки результатов каждого из методов диагностики. На основе Python PyQt5 разработан пользовательский интерфейс для работы с ПЗС-камерой для записи параметров поперечного сечения пучка ВЭПП-3. Был получен патент о государственной регистрации программного обеспечения для записи профиля пучка в многокадровом режиме. Автор внес определяющий вклад в монтаж и настройку систем диагностики пучка на стенде линейного ускорителя СКИФ.

Содержание диссертации и основные положения, представленные на защиту, отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Все экспериментальные результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном и определяющем участии автора.

Структура и объем диссертации

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 на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении подтверждается актуальность диссертационной работы, кратко описываются особенности методов диагностики в современных

ускорительных системах, определяются цели диссертации, формулируются задачи работы, демонстрируется новизна, указывается практическая значимость работы, определяются научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой комментарий к текущему положению 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. Кратко охарактеризован источник синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ.

Вторая глава посвящена вопросам проектирования системы диагностики пучка стенда линейного ускорителя СКИФ. На основании конструктивных требований ускорителя был разработан люминофорный экран для измерения поперечного размера пучка электронов (рисунок 1). Дана характеристика его основных компонент и конструктивного решения, обеспечивающего необходимую точность управления положением экрана относительно оси вакуумной камеры.

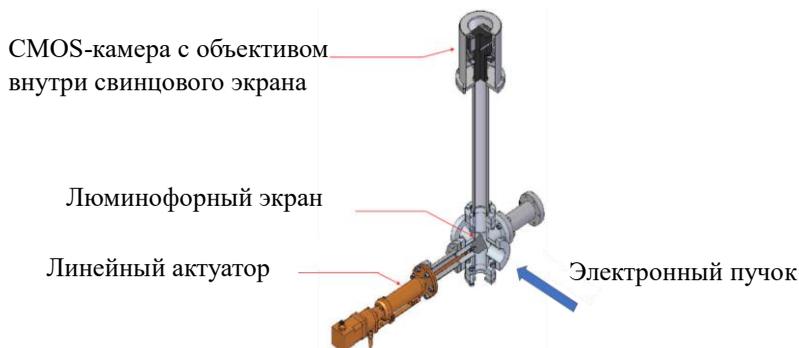


Рисунок 1 – Схема конструкции люминофорного экрана на линейном ускорителе СКИФ

Магнитный спектрометр, способный проводить измерения в широком диапазоне энергий, был разработан для определения энергии и энергетического разброса пучка по мере ввода в строй различных узлов линейного ускорителя (рисунок 2). На экспериментальном производстве ИЯФ

СО РАН были проведены измерения магнитного поля спектрометра, чтобы подтвердить его соответствие проектным параметрам.



Рисунок 2 – Внешний вид магнитного спектрометра

На рисунке 3 показаны расчеты аппаратной функции спектрометра и профили пучка для различных величин его энергии и энергетического разброса, ожидавшихся в экспериментах. Исследовано возможное влияние на результаты измерений гамма-излучения, возникающего из-за взаимодействия электронного пучка с медным коллиматором на входе в спектрометр.

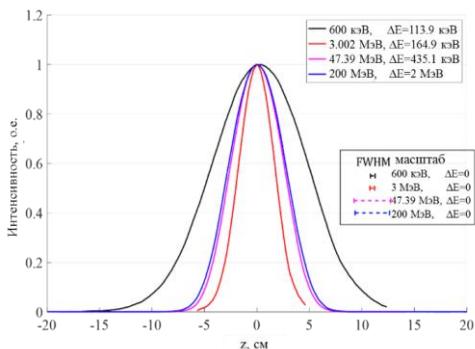


Рисунок 3 – Смоделированное распределение пучка на люминоформном экране при энергии, соответствующей разным каскадам линейного ускорителя

Вторая схема измерения энергии предлагается для решения проблемы, заключающейся в том, что магнитный спектрометр не может обеспечить заданную точность при энергии пучка 200 МэВ. С этой целью возможно использование люминофорного экрана и диполя в канале линак – бустер, как показано на рисунке 4. Результаты моделирования динамики пучка подтверждают, что возможностей такой диагностической схемы достаточно, чтобы компенсировать отсутствие измерений магнитным спектрометром.

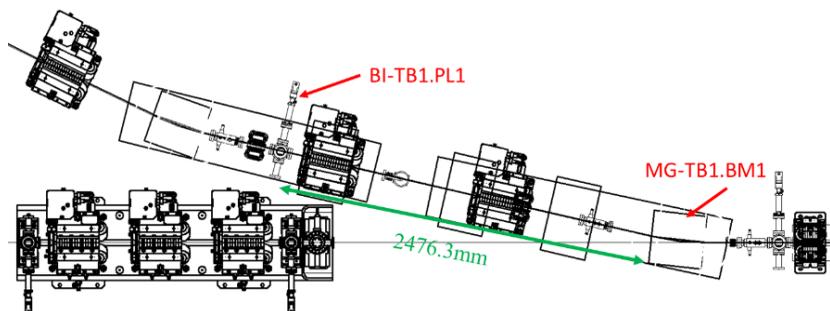


Рисунок 4 – Схема расположения люминофорного экрана (BI-TB1.PL1) и диполя (MG-TB1.BM1) в канале линейного ускорителя-бустера, которые будут использоваться для измерения энергии и энергетического разброса пучка линака при $E = 200$ МэВ

Черенковский датчик для измерения длительности пучка был разработан на основе радиаторов двух типов (рисунок 5). По результатам численного моделирования была определена толщина кварцевой пластины и аэрогеля (рисунки 6, 7) и спроектирована соответствующая оптическая система (рисунок 8). Определены размеры и оптические параметры каждого из компонентов оптической системы. Разработанная схема диагностики позволяет реализовать временное разрешение при измерениях длительности пучка в несколько пикосекунд.



Рисунок 5 – Черенковский детектор и стрик-камера

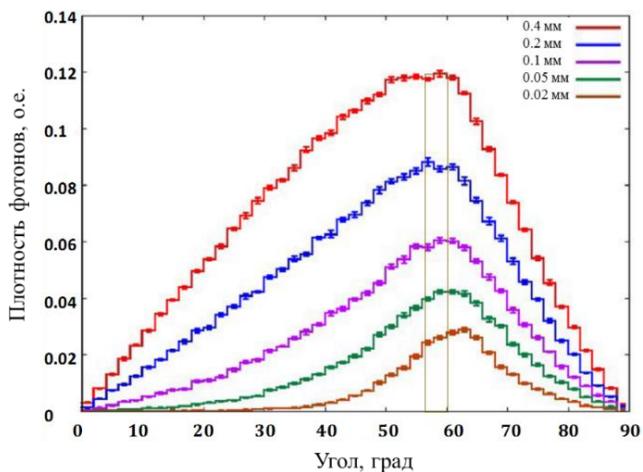


Рисунок 6 — Угловое распределение черенковского излучения пучка электронов с энергией 0,6 МэВ через кварцевую пластину разной толщины. Выделен диапазон по углу в 3,5 градуса

Угловое распределение фотонов Черенкова, аэрогель (5 мм)

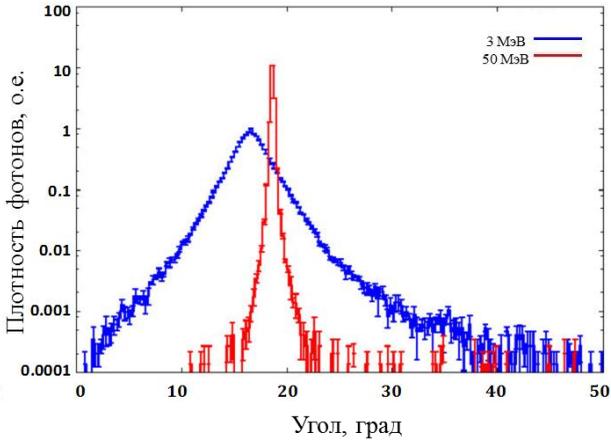


Рисунок 7 – Угловые распределения черенковских фотонов, испускаемых электронным пучком с энергией 3 МэВ и 50 МэВ, проходящим через 5 мм аэрогеля

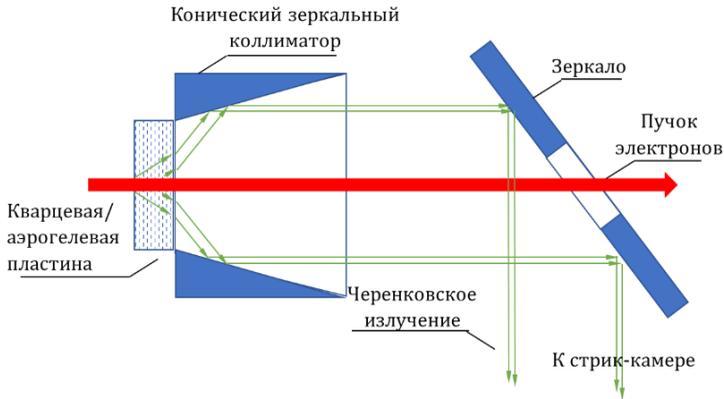


Рисунок 8 – Схема черенковского датчика для измерения продольного профиля пучка

Для трех вышеуказанных приборов были разработаны соответствующие управляющие программы и программы визуализации

результатов измерений, использующиеся на стенде линейного ускорителя СКИФ.

Цилиндр Фарадея используется для измерения заряда пучка и его поглощения. С помощью численного моделирования были определены материал и размеры цилиндра, а также уточнена схема расположения радиационной защиты (рисунок 9).

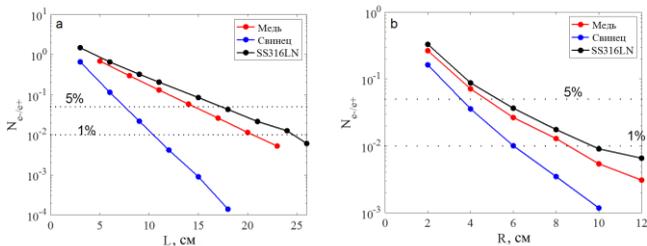


Рисунок 9 – Моделирование при $E = 200$ МэВ (а) соотношения первичных и вторичных электронов, вылетающих на выходе из цилиндра Фарадея, в зависимости от толщины и (б) количества первичных и вторичных электронов, вылетающих с поверхности цилиндра Фарадея, в зависимости от радиуса

Третья глава представляет результаты реального применения всех разработанных диагностических инструментов на стенде линейного ускорителя. *Люминофорные экраны* были размещены вдоль вакуумной камеры ускорителя за ВЧ пушкой, в канале группировки, за предускорителем и за ускоряющей структурой ускорения для измерения поперечных размеров пучка, а также использовались для настройки режима работы ускорителя и проводки пучка. Типичный результат измерения показан на рисунке 10. Экран имеет пространственное разрешение 0,03 мм.

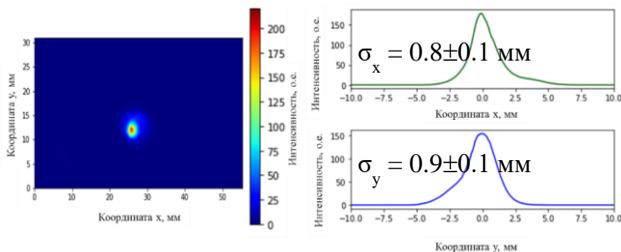


Рисунок 10 – Профиль пучка после ускоряющей структуры, $\sigma_x = 0,8 \pm 0,1$ мм, $\sigma_y = 0,9 \pm 0,1$ мм

Геометрические измерения эмиттанса также проводились с помощью люминофорного экрана, результаты показаны на рисунке 11. Измеренное значение эмиттанса согласуется с расчетной величиной.

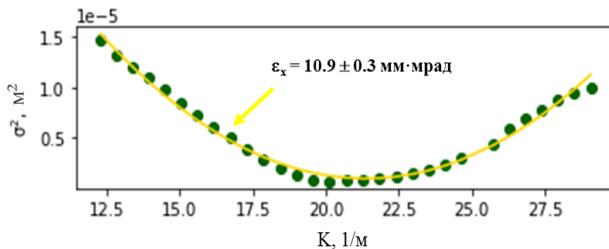


Рисунок 11 – Определение эмиттанса пучка ВЧ пушки с помощью соленоидального сканирования

Еще одно применение люминофорного экрана возникло в связи с корректировкой планов отладки линейного ускорителя. Экран использовался вместе с дипольным корректором для измерения энергии пучка после ВЧ-пушки, в канале группировки и за предускорителем. Типичные результаты измерений показаны на рисунке 12, точность измерения энергии составляла 5 %.

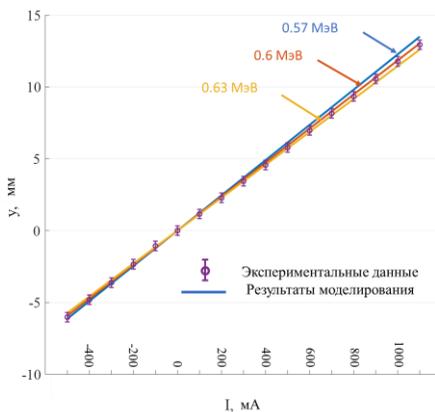


Рисунок 12 – Измерение энергии пучка после ВЧ пушки по его смещению на люминофорном экране под действием магнитного корректора

Измерение энергетического разброса пучка ВЧ-пушки производилось при коллимировании его поперечного сечения на входе в *магнитном спектрометр*,

$\Delta E = 35 \pm 7$ кэВ (рисунок 13). Ширина щели коллиматора 0.5 мм соответствует энергетическому диапазону 12.5 кэВ на люминоформном экране спектрометра и определяет аппаратную функцию прибора.

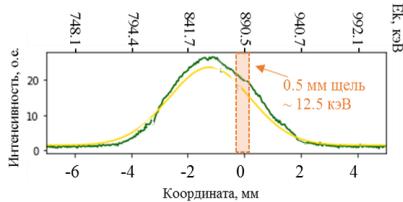


Рисунок 13 – Определение энергетического разброса пучка с помощью магнитного спектрометра. Зеленая кривая – зарегистрированный профиль пучка, желтая кривая – подгонка Гауссовым распределением

Минимальный обнаруживаемый сдвиг изображения пучка на люминоформном экране при фиксированной энергии пучка, вызванный изменениями магнитного поля спектрометра, позволяет оценить энергетическое разрешение магнитного спектрометра величиной около 1%.

Измерения длительности пучка с помощью *черенковского датчика* также производились в различных точках линейного ускорителя: после ВЧ пушки, в канале группировки, после предускорителя, и на выходе линака, после ускоряющей ВЧ структуры. Измерения осуществлялись как для многосгусткового пучка (рисунок 14 слева), так и для одиночного банча (рисунок 14 справа).

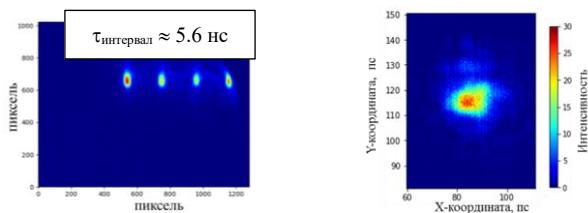


Рисунок 14 – Изображение пучка в черенковском свете. Слева: многосгустковый пучок при низкой скорости развертки стрик-камеры, справа: один сгусток в пучке, измеренный с высоким временным разрешением.

Наилучшая полученная аппаратная функция, определявшаяся по размеру светового пятна черенковского излучения, сфокусированного на фотокатод стрик-камеры, составила 2,8 пс. Это значение было получено на выходе линака.

Типичный продольный профиль пучка, зарегистрированный с помощью стрик-камеры, показан на рисунке 15.

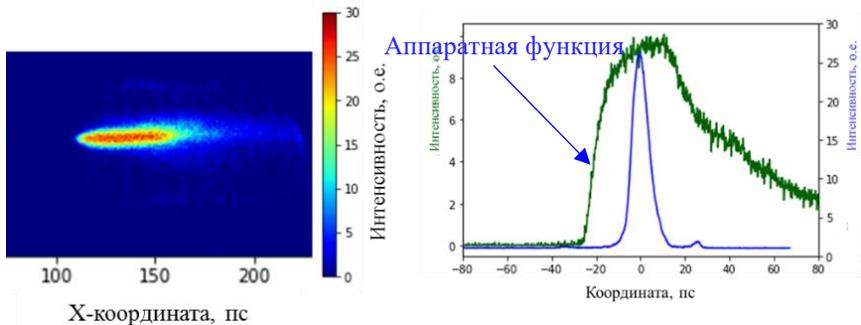


Рисунок 15 – Изображение и распределение пучка в канале группировки, длина пучка FWHM = 60 пс, зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = -0,58 рад, фазе пучка = 76 °, напряжение модулятора $U_m = 50$ В

Цилиндр Фарадея, используемый для измерения заряда при низких энергиях пучка, представляет собой высоковакуумная часть ввода ВЧ мощности, имевший керамическую вставку, позволяющую оторвать приемник пучка от земли (рисунок 16). Измеренная емкость на землю приемника пучка составляла 2 пФ. Измеренное цилиндром соотношение между зарядом пучка и напряжением смещения ВЧ-пушки показано на рисунке 17.



Рисунок 16 – Цилиндр Фарадея за ВЧ пушкой

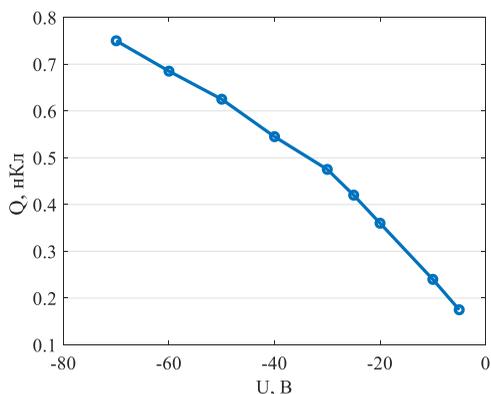


Рисунок 17 – Заряд пучка ВЧ пушки в зависимости от напряжения смещения на модулирующей сетке

На стенде ускорителя в качестве поглотителя пучка использовался массивный цилиндр из Д16Т, для измерений заряда выводился из вакуумной камеры через разделительную титановую фольгу (рисунок 18).



Рисунок 18 – Цилиндр Фарадея и сигнал с него в конце стенда линака

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. На рисунке 19 показано изменение поперечного размера пучка при его инъекции в ВЭПП-3.

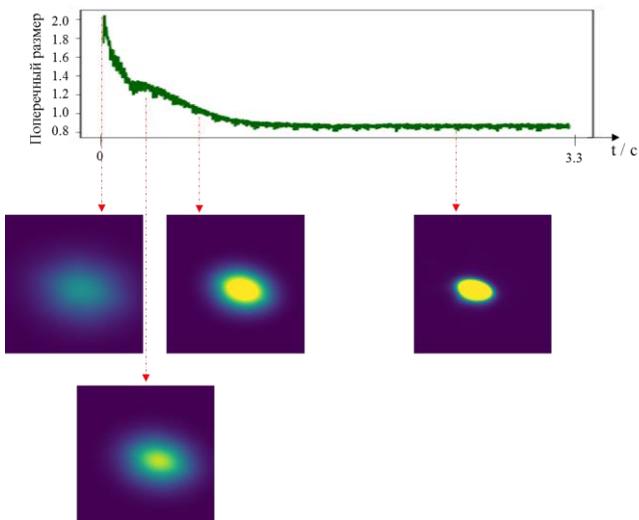


Рисунок 19 – Динамика пучка во время инъекции в ВЭПП-3.

В Заключении представлены основные результаты работы.

Приложение А содержит все результаты измерений магнитного поля магнитного спектрометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена созданию системы диагностики линейного ускорителя и бустера источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ, строящегося в Новосибирске. В работе кратко рассмотрены направления развития современных циклических ускорителей и повышенные требования к диагностическим системам, используемым на них для измерения параметров пучков частиц.

Основные результаты диссертационной работы

Произведено численное моделирование магнитного спектрометра для измерения энергии и энергетического разброса пучка линака СКИФ. Результаты моделирования учтены в конструкции спектрометра, изготовленного и прошедшего магнитные измерения. Спроектирован и промоделирован численно черенковский датчик, предназначенный для

измерения продольного профиля пучка линейного ускорителя. Разработана конструкция люминофорных датчиков для диагностики поперечного профиля пучка. Все эти диагностические устройства изготовлены в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН и использовались при запуске линейного ускорителя на специализированном стенде.

Осуществлена модернизация системы оптической диагностики ускорителя ВЭПП-3. Новый диагностический комплекс, введенный в строй на ВЭПП-3, предназначен, в том числе, для прототипирования системы оптической диагностики на бустере СКИФ. Написано программное обеспечение для измерения поперечного профиля пучка на ВЭПП-3 и получен патент о государственной регистрации программного обеспечение.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

[1]. Beam diagnostics for linear accelerator of SKIF synchrotron light source / M. Xiaochao, Y. I. Maltseva, O. I. Meshkov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17. – № 4. – P. T04001. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/04/T04001> – Дата публикации: 01.04.2022.

[2]. Измерение параметров ВЧ пушки линейного ускорителя Сибирского Кольцевого Источника Фотонов / С. Ма, М. В. Арсентьева. А. М. Батраков [et al.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 14–27. – URL: <http://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27> – Дата публикации: 21.07.2023.

[3]. Beam loss monitoring system for the SKIF synchrotron light source / Y. I. Maltseva, S. V. Ivanenko, M. Xiaochao [et al.]. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17. – № 5. – P. T05004. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/05/T05004> – Дата публикации: 01.05.2022.

[4]. Beam Instrumentation for Linear Accelerator of SKIF Synchrotron Light Source / X. C. Ma, M. V. Arsentyeva, E. A. Bekhtenev [et al.]. – Текст: электронный // IPAC 2021 - Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. – Campinas, SP, Brazil : JACoW, 2021. – P. 1016- 1019. – URL: <http://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB328> – Дата публикации: 21.03.2021.

[5]. Beam Loss Diagnostics System for SKIF Synchrotron Light Source / X. C. Ma, Y. I. Maltseva, O. I. Meshkov [et al.]. – Текст : электронный // IPAC2021 - Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference.– Campinas, SP, Brazil : JACoW, 2021. – P. 1012-1015. – URL:<http://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB327> – Дата публикации: 26.03.2021.

[6]. Picosecond streak-cameras for bunch diagnostics in accelerators / N. S. Vorobiev, P. B. Gornostaev, V. L. Dorokhov [et al.]. – Текст : электронный // Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics / eds. T. G. Etoh, H. Shiraga. – Osaka, Japan : SPIE, 2017. – Vol. 10328. – P. 103280N. – URL: <https://doi.org/10.1117/12.2268720> – Дата публикации: 20.02.2017.

[7]. Патент № 2022668588 Государственная регистрация программы для ЭВМ. Beam Diagnostic Control System (BDCS) : № 2022667230 : заявл. 10.10.2022 : опубл. 23.09.2022 / Ма Сяочао (CN), Дорохов Виктор Леонидович (RU) – 1 с. – URL: <https://fips.ru/EGD/76757fd4-baea-400cb55b-7df6da012319> – Дата публикации: 27.09.2021.

Ma Sяочао

Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для
источника синхротронного излучения СКИФ

Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать « 13 » _____ октября _____ 2023 г.

Заказ № _____ 15 _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____ ИЯФ СО РАН _____