

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

МА СЯОЧАО

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

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Мешков Олег Игоревич

Новосибирск – 2023

Оглавление

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. Диагностика пучка источников синхротронного излучения...	13
1.1 Свойства синхротронного излучения и современные источники синхротронного излучения	13
1.2 Развитие методов диагностики пучка.....	22
1.3 Источник СИ поколения 4+ СКИФ в Новосибирске	28
ГЛАВА 2. Проектирование системы диагностики пучка линейного ускорителя на СКИФ	32
2.1 Линейный ускоритель СКИФ.....	32
2.2 Люминофорные экраны	38
2.2.1 Люминофорная мишень	42
2.2.2 Линейный актуатор САНВ-10.....	46
2.2.3 Цифровая камера CMOS	46
2.3 Магнитный спектрометр.....	48
2.3.1 Конструкция спектрометра.....	48
2.3.2 Принцип действия спектрометра	55
2.3.3 Моделирование магнитного спектрометра	59
2.3.4 Измерение энергетического разброса пучка с энергией 200 МэВ.....	63
2.4 Черенковский датчик	68
2.4.1 Принцип действия черенковского датчика	68
2.4.2 Моделирование черенковского датчика.....	71
2.4.3 Конструкция черенковского датчика	74
2.5 Цилиндр Фарадея.....	79
2.5.1 Моделирование поглощения частиц в цилиндре Фарадея.....	80
2.5.2 Моделирование радиационной защиты.....	82

ГЛАВА 3. Настройка режимов работы линейного ускорителя СКИФ на стенде ..	86
3.1 Измерение поперечных размеров и эмиттанса пучка	86
3.1.1 Измерение поперечного профиля пучка после ВЧ пушки	86
3.1.2 Измерение поперечного профиля пучка после ускорителя-группирователя	89
3.1.3 Измерение поперечных профилей пучка после ускоряющей структуры	90
3.2 Измерение энергии и энергетического разброса пучка	92
3.2.1 Измерение энергии и энергетического разброса пучка после ВЧ пушки	92
3.2.2 Измерение энергии пучка после ускорителя-группирователя	96
3.2.3 Измерение энергии и энергетического разброса пучка после ускоряющей структуры	97
3.3 Измерение заряда пучка с помощью цилиндра Фарадея	100
3.4 Измерение продольного распределения заряда в пучке с помощью черенковских датчиков	105
3.4.1 Измерение продольного профиля пучка после ВЧ пушки	105
3.4.2 Измерение продольного профиля пучка после предускорителя-группирователя (третий черенковский датчик)	111
ГЛАВА 4. Прототип оптической системы диагностики бустера СКИФ..	115
4.1 Проект системы оптической диагностики бустера СКИФ	115
4.2 Разработка программного обеспечения для измерения пучка	125
4.3 Результаты экспериментов на ВЭПП-3	128
Заключение	129
Список сокращений и условных обозначений	131
Список литературы	135
Список рисунков	145

Список таблиц	156
Приложение А. Результаты измерений магнитного поля дипольного магнита спектрометра	158

ВВЕДЕНИЕ

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 исследования

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 [3].

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 на 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 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 [3-5], а также 3 - в сборниках трудов конференций [6-8], получен патент на регистрацию программы для ЭВМ [9].

Личный вклад автора

В публикациях [3], [6], 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 взаимодей-

ствия 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 публикации [3], [6] является определяющим.

В статье [4] описано первое применение оборудования, созданного на основе работы [3]. Все результаты диагностики, упомянутые в статье [4], получены с помощью системы диагностики, разработанной в [3]. Автор участвовал в проведении экспериментов и занимался обработкой и анализом результатов и внес основополагающий вклад в публикацию [4].

В работах [5], [7] 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 [8] автор участвовал в измерениях временных параметров импульсного излучения накопителя с помощью пикосекундной стрик-камеры. Была получена зависимость длины сгустка от тока.

Программный код для реализации функций, описанных в [9], 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.

В публикации [10] автор обеспечил все измерения параметров пучка и последующий анализ результатов с помощью средств диагностики, описанных в диссертации, а также участвовал в настройке режимов работы линейного ускорителя СКИФ.

Содержание диссертации и основные положения, представленные на защите, 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 118 страниц текста, включая 128 рисунков и 22 таблицы. Библиография включает 88 наименований на 10 страницах.

ГЛАВА 1. Диагностика пучка источников синхротронного излучения

1.1 Свойства синхротронного излучения и современные источники синхротронного излучения

Синхротронное излучение (СИ) — электромагнитное излучение, испускаемое по касательной к траектории заряженными частицами, движущимися со скоростью, близкой к скорости света. Впервые СИ на циклическом ускорителе наблюдалось Элдер и др. в 1947 году на американском синхротроне компании «Дженерал Электрик» [11], [12]. Первый эксперимент с использованием синхротронного излучения в Новосибирске был проведен на ускорителе ВЭПП-3 в 1973 году. По сравнению с обычными источниками света, синхротронное излучение имеет много существенных преимуществ. Его непрерывный и широкий спектр, который может быть рассчитан с высокой точностью, простирается от инфракрасного до рентгеновского диапазона, и допускает выделение любой длины волны при помощи монохроматора; СИ имеет малую угловую расходимость и яркость в 10^3 - 10^6 раз выше, чем у обычных источников света. Синхротронное излучение имеет импульсную временную структуру, т.е. допускает использование для изучения быстропротекающих процессов и обладает высокой стабильностью. Благодаря этим своим свойствам синхротронное излучение на протяжении последних десятилетий широко используется в физике конденсированного состояния вещества, атомной и молекулярной физике, химии, медицине, материаловедении, науках о жизни, экологии, энергетике, информационных технологиях, и радиометрии. Действующий источник синхротронного излучения в настоящее время является крупной многопрофильной научной установкой и занимает важное место в развитии современной науки и техники. На сегодняшний день в мире построено или строится более 60 исследовательских центров на основе источников синхротронного излучения [13].

Яркость, создаваемая электронным пучком, единицей измерения которой является фотон/ с/ мм²/ мрад² /0,1% ширины полосы, зависит от поперечного размера и угловой расходимости электронного пучка, произведение которых называется эмиттанс. Снижение эмиттанса электронного пучка приводит к увеличению яркости излучаемого им СИ. Спектр синхротронного излучения из дипольных магнитов и расходимости накопителя СКИФ представлены на рисунках 1.1 и 1.2.

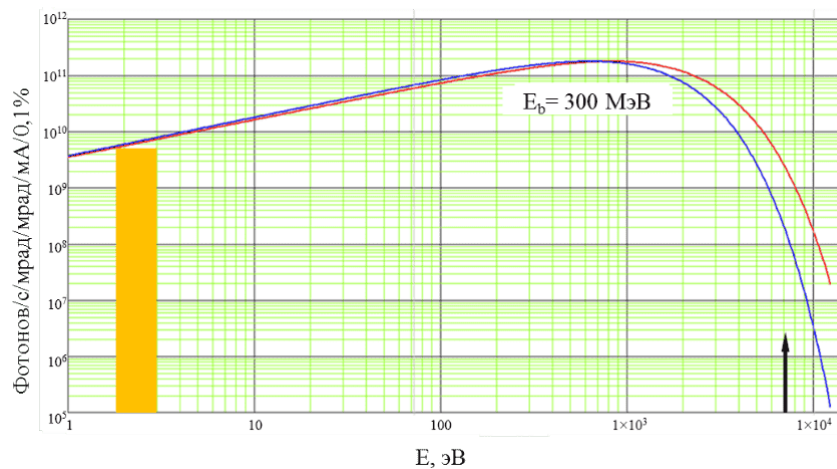


Рисунок 1.1 – Спектр синхротронного излучения из дипольных магнитов супер-периода СКИФ для энергии пучка $E_b = 3000$ МэВ. Заштрихован диапазон энергий, соответствующий оптической области спектра. $B = 5$ кГс (красный) и $3,5$ кГс (синий)

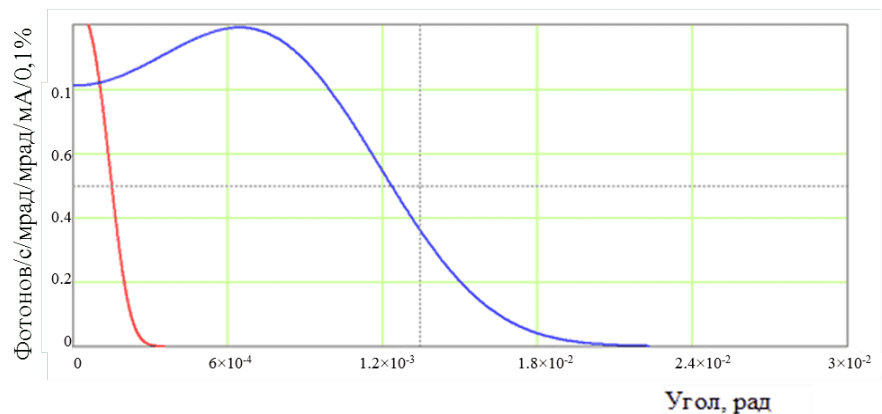


Рисунок 1.2 – Расходимость синхротронного излучения накопителя СКИФ из «сильного» диполя в вертикальной плоскости для длины волны 1 нм (красная кривая) и для «слабого» диполя на 500 нм (синяя кривая), $E_b = 3000$ МэВ

Изучение и применение синхротронного излучения началось в 1960-х годах, и за последние полвека было создано четыре поколения синхротронных источников света. Источник синхротронного излучения *первого поколения* представляет собой машину двойного назначения, действующей совместно с высокоэнергетическим коллайдером, предназначенным для экспериментов по физике высоких энергий. Источник синхротронного излучения *второго поколения* представляет собой специализированный накопитель, предназначенный для генерации синхротронного излучения. Одновременно с разработкой источников синхротронного излучения второго поколения значительный прогресс был достигнут в разработке «вставных устройств», таких, как вигглеры и ондуляторы (рисунок 1.3).

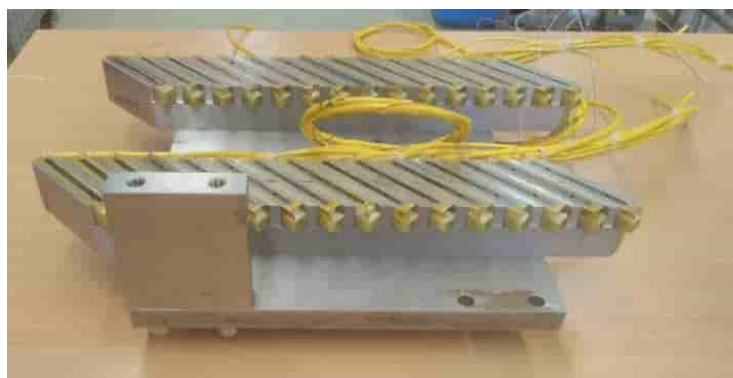


Рисунок 1.3 – Прототип обмоток сверхпроводящего эллиптического ондулятора, разработанного в ИЯФ СО РАН, планируется использовать в накопителе СКИФ [14]

Вставные устройства представляют собой магнитный элемент, полярность которого периодически меняется в пространстве. Эти компоненты расположены в виде прямых сегментов накопительного кольца, а траектории, по которым проходят электроны, представляют собой синусоиду и перпендикулярны магнитному полю. Поскольку интеграл магнитного поля вставных устройств равен нулю на прямолинейном отрезке, то идеальная орбита электронов вне прямолинейного отрезка не изменяется. Спектр сверхпроводящего эллиптического ондулятора под нулевым углом показан на рисунках 1.4 и 1.5.

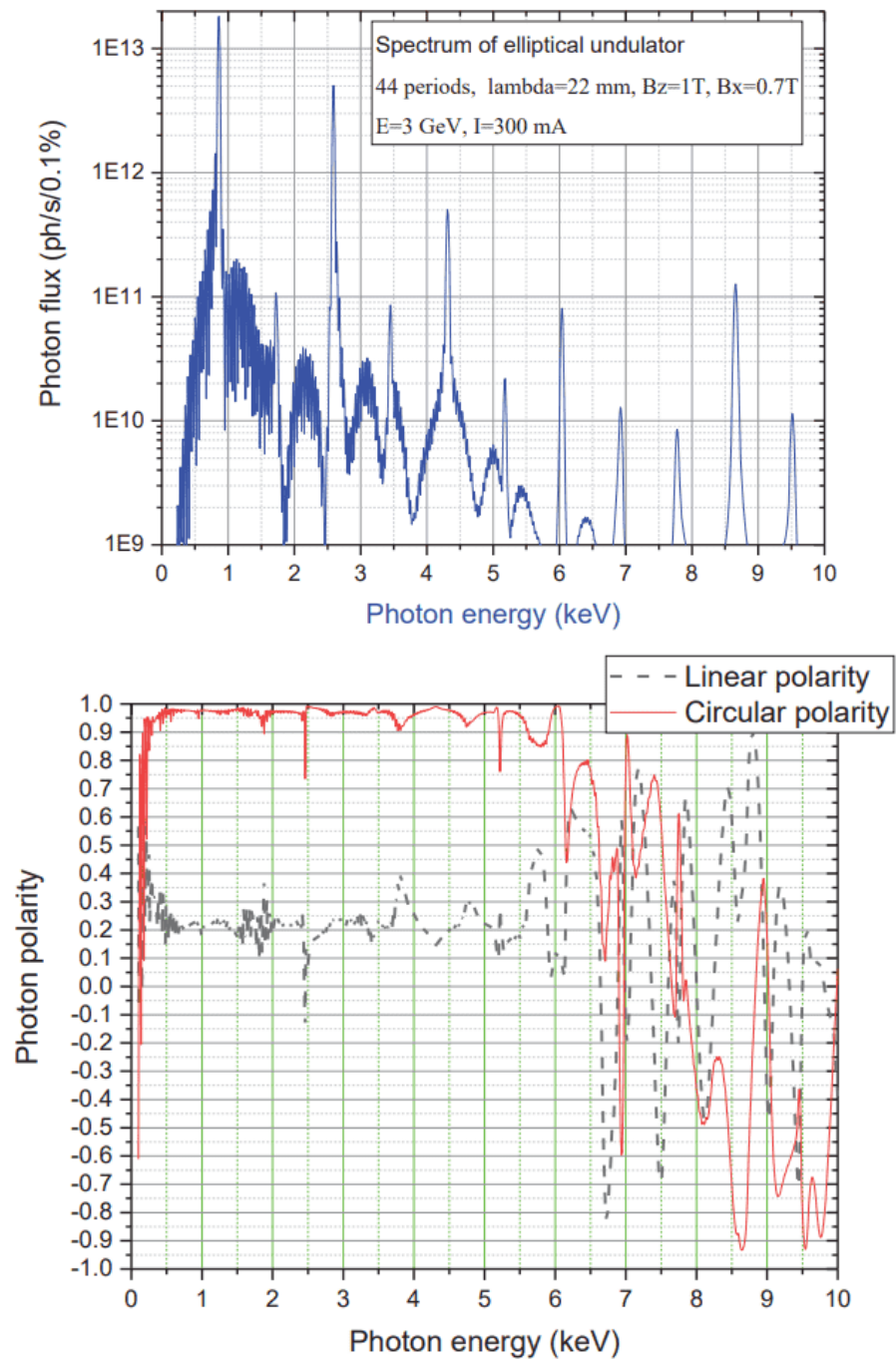


Рисунок 1.4 – Спектр сверхпроводящего эллиптического ондулятора под нулевым углом. Вверху поток фотонов в секунду в телесный угол 10 микрорадиан. На картинке ниже показана степень круговой поляризации [14]

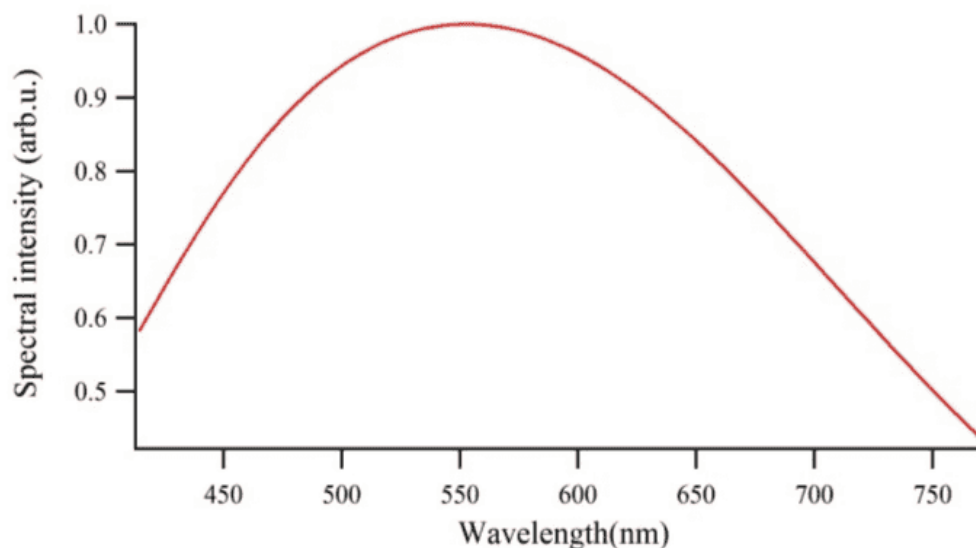


Рисунок 1.5 – Спектр СИ, испускаемого под углом 2-3 мрад из пучка электронов с энергией 500 МэВ, пересекающего ондулятор с 3 периодами, $\lambda_u = 12$ см. Моделируется с помощью SRW [15]

Разработка и применение технологии вставных устройств позволяет источнику синхротронного излучения иметь малый эмиттанс и получать синхротронное излучение с долговременной стабильностью тока пучка и высокой яркостью, а также с высоким качеством по поляризации и когерентности. Поэтому с 1990-х годов появилось новое поколение новых источников света с использованием вставных устройств — источник света синхротронного излучения *третьего поколения*, такие как Европейский источник синхротронного излучения ESRF [16]. в Grenoble и источник синхротронного излучения SPring-8 [17] в Японии (рисунок 1.6, рисунок 1.7).

В большинстве источников синхротронного излучения третьего поколения магнитная структура основана на Double Bend Achromat (DBA) или Triple Bend Achromat (ТВА) для достижения эмиттанса пучка в диапазоне нескольких нанометров·радиан [1] (рисунок 1.8).



Рисунок 1.6 – Фотография здания ESRF, Гренобль, Франция [16]



Рисунок 1.7 – Фотография здания SPring-8, Цукуба, Япония [17]

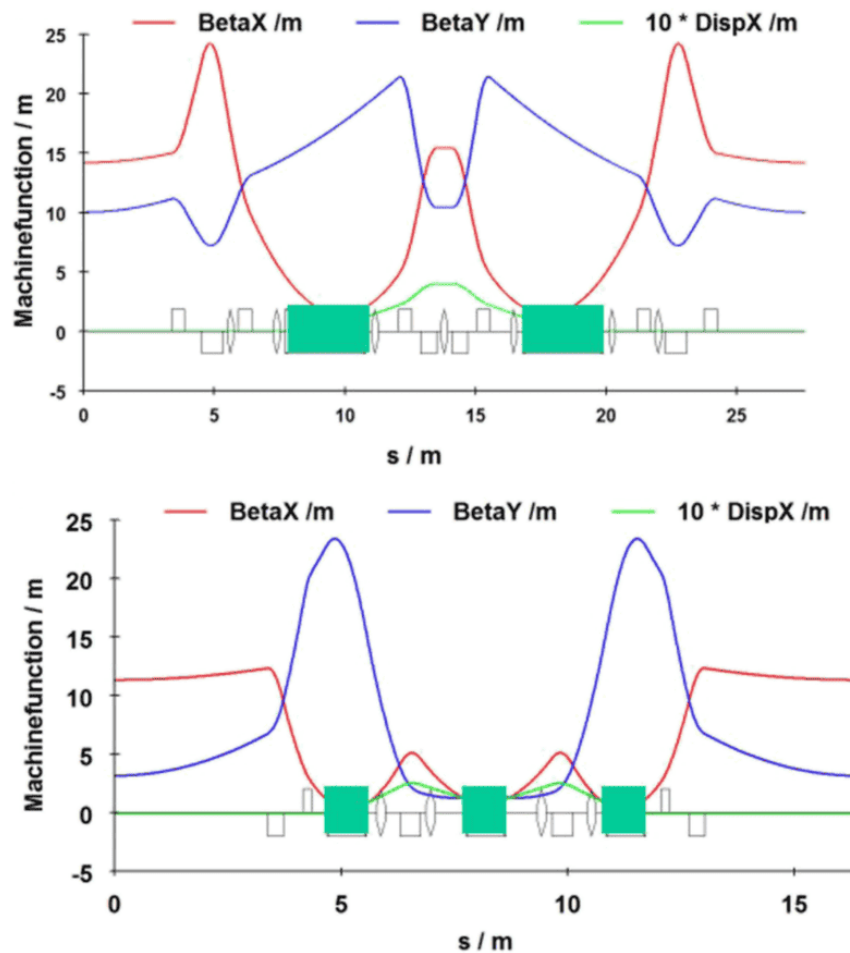


Рисунок 1.8 – Типичные структурные функции для накопительных колец третьего поколения. Вверху: структурные функции для DBA. Внизу: структурные функции для TBA [1]

Дополнительная инжекция (top-up injection), то есть инжекция при открытых фотонных затворах каналов вывода СИ, обеспечивает практически бесконечное время жизни пучка в накопителе. Этот прием стал стандартным режимом работы для накопительных колец третьего поколения [18]. Разработка и применение поворотных магнитов с сильным магнитным полем, так называемых шифтеров (от английского "shift" - сдвигать), расширили спектральный диапазон низкоэнергетических накопительных колец. Сверхпроводящий шифтер, разработанный ИЯФ СО РАН, показан на рисунке 1.9. На рисунке 1.10 показана разница между спектром СИ поворотного магнита и шифтера.



Рисунок 1.9 – Сверхпроводящий шифтер с магнитным полем 10 Т - Wavelength Shifters (производства ИЯФ СО РАН), используемый в SPring-8. Устройство имеет самую высокую напряженность магнитного поля в мире [19]

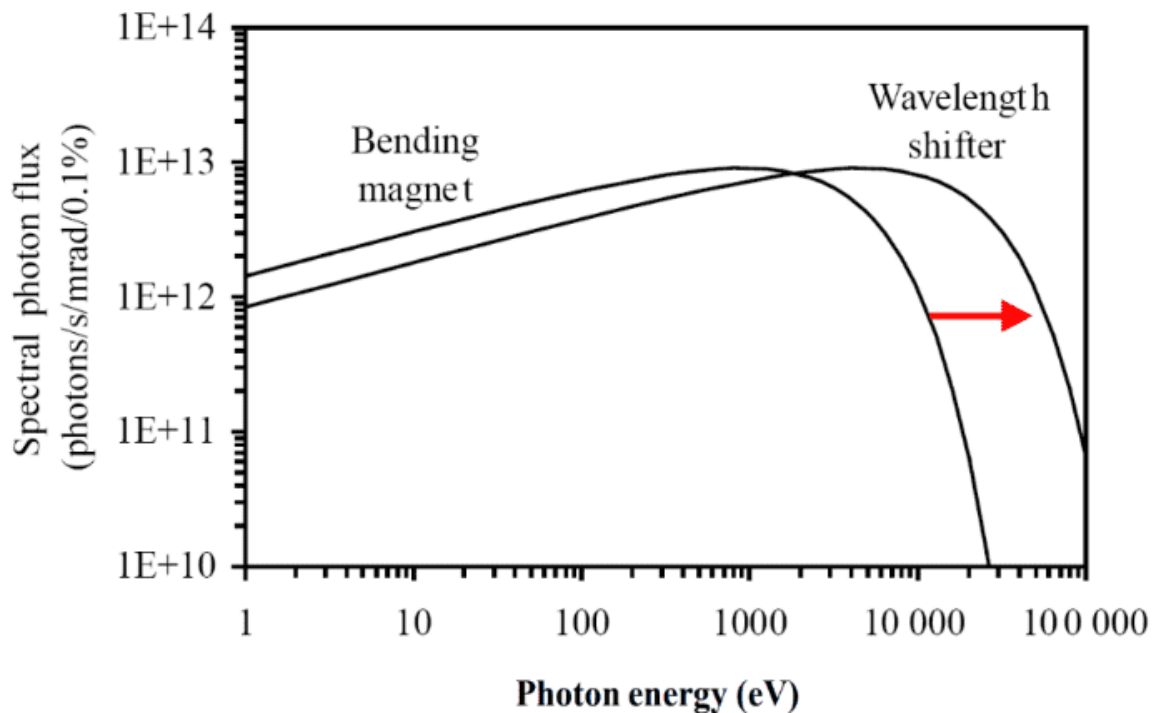


Рисунок 1.10 – Разница между спектром СИ из поворотного магнита (1,2 Тл) и спектром СИ из шифтера с полем 6 Тл при $E_b = 2$ ГэВ, $I_b = 200$ мА: форма кривой не изменилась, но спектр стал более «жестким» [20]

Высшие гармоники ондуляторного излучения используются для генерации более энергичных фотонов и гамма-квантов. По мере развития исследований пользователи выдвигают все более высокие требования к синхротронным источникам света: более высокая пиковая яркость, поперечная и временная когерентность, ультракороткие импульсы (от <100 фс до менее нескольких фс), контроль поляризации и т. д., и этими свойствами обладают источники СИ *четвертого поколения*. Магнитная конструкция этих установок основана на Multi Bend Achromat (МВА) (рисунок 1.11), что позволяет понизить эмиттанс пучка еще один-два порядка по сравнению с третьим поколением источников СИ [21] до сотен пикометров-радиан или даже менее 100 пм. Ускорительные комплексы MAX-IV [22], SIRIUS [23] и ESRF-EBS [24] являются действующими синхротронными источниками четвертого поколения. В настоящее время многие действующие источники синхротронного излучения имеют проекты модернизации до уровня четвертого поколения, например, APS-U [25], ALS-U [26], PETRA-IV [27]. Сравнение эмиттансов некоторых накопительных колец в мире показано на рисунке 1.12.

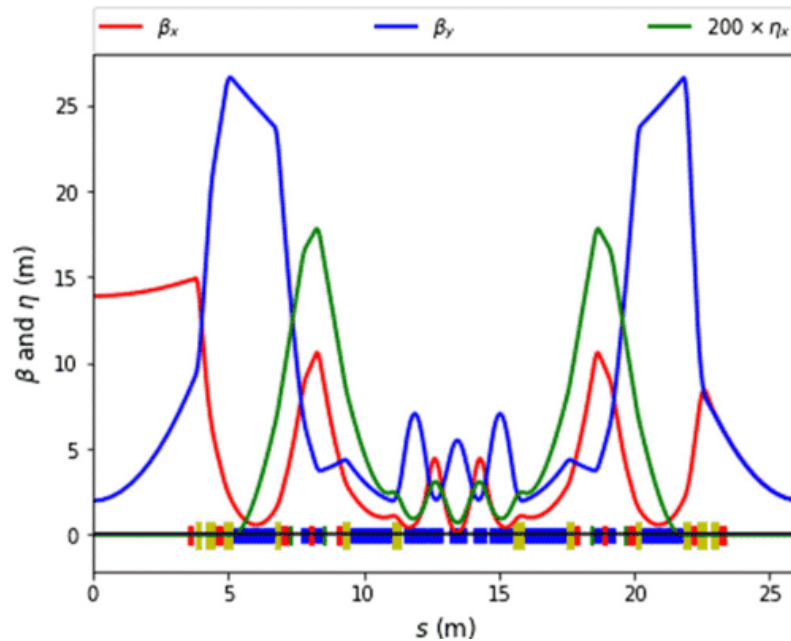


Рисунок 1.11 – Структурные функции МВА в проекте модернизация источника СИ NSLS-II (Брукхевен, США) [21]

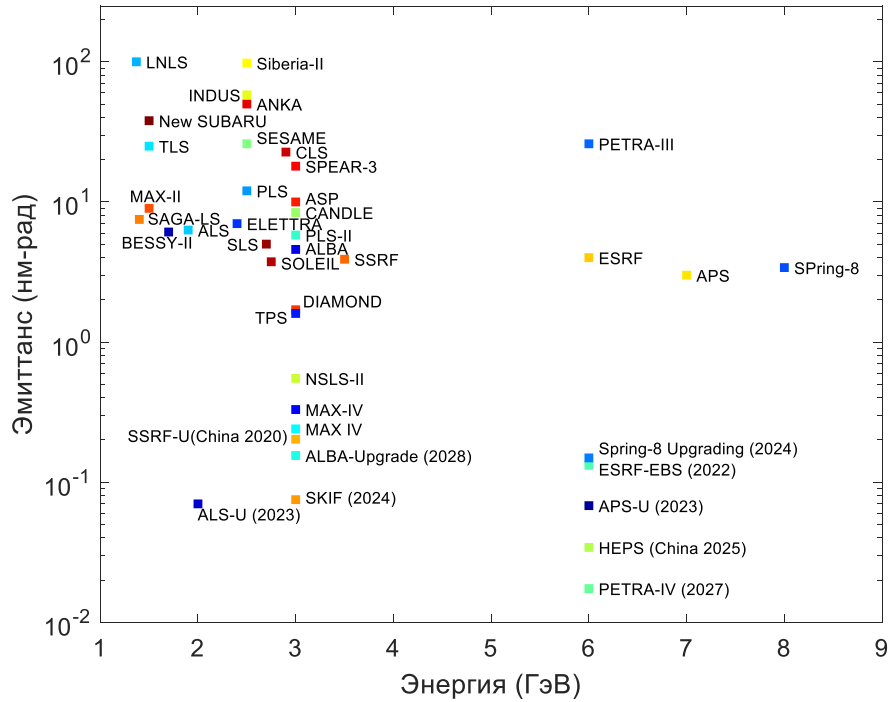


Рисунок 1.12 – Эмиттанс и энергия пучка современных источников синхронного излучения

1.2 Развитие методов диагностики пучка

Диагностика пучка является неотъемлемой частью современных ускорительных систем. Ее функции заключаются в измерении энергии, энергетического разброса, эмиттанса, заряда, продольного и поперечного размеров пучка в заданной точке траектории, частот колебаний пучка и т.д. Система диагностики – это средство проверки соответствия ускорителя проектным характеристикам, средство отладки при штатной работе ускорителя и средство исследования в экспериментах по физике ускорителей.

Различные методы диагностики основаны на разных принципах: одни, как цилиндры Фарадея и ионизационные камеры, основаны на кулоновском взаимодействии заряженных частиц, другие, такие как токовые трансформаторы и пикап-электроды, основаны на электромагнитном действии пучка, некоторые, например, мониторы потерь пучка и электронные поляриметры используют ме-

тоды ядерной физики. Существуют также методы, основанные на регистрации оптического излучения разной природы: переходное излучение, синхротронное излучение, дифракционное излучение, черенковское излучение и т.д. В комптоновских лазерных поляриметрах используется взаимодействие заряженных частиц с фотонами [28]. Условно, можно разделить средства диагностики на разрушающие и неразрушающие. Под разрушающей диагностикой понимается та, что приводит к потере частиц пучка, что делает невозможным ее использование в непрерывном режиме. Типичным примером являются люминофорные экраны, люминофоры которых взаимодействуют непосредственно с исследуемым пучком. Однако, благодаря простоте, эффективности и дешевизне этого метода измерения он очень популярен при диагностике пучка в ускорителях. Методы измерения параметров пучка с помощью оптических и электромагнитных датчиков относятся к неразрушающим [29], [30]. При использовании таких диагностик сводится к минимуму влияние диагностических элементов на свойства пучка. Например, такой является оптическая диагностика с использованием синхротронного излучения. Различие между разрушающим и неразрушающим методом часто зависит от обстоятельств, поэтому всякая классификация отчасти условна [31].

На рисунке 1.13 перечислены основные устройства, используемые для диагностики пучков, и свойства, которые они могут измерять. Из-за большого разнообразия установок, таких как линейные ускорители, циклотроны, синхротроны, накопительные кольца и транспортные линии, требования к системам диагностики пучков заметно различаются, количество диагностических средств весьма велико.

Измеренные свойства	Интенсивность / Заряд	Поперечный			Продольный		Q-значение+ ΔQ	Энергия+ ΔE	Поляризация	Влияние на пучки			
		Положение	Размер / Профиль	Эмиттанс	Размер / Профиль	Эмиттанс				Нет	Назначений	Тревожный	Разрушительный
Датчик тока пучка (ФСТ)	√				√	√				x			
Пристеночные датчики изображения	√	√			√	√				x			
Пикап - электроды	√	√	√		√	√				x			
Цилиндр Фарадея	√												
Мониторы вторичного излучения	√	√	√	√				+			x	x	
Проводные сканирования		√	√	√							x		
Проволочный сканер		√	√								x	x	
Ионизационные камеры	√										x	x	
Мониторы потерь пучка		+	+	+	+		+			x			
Газовая мишень		√	√	√							x		
Люминофорный экран		√	√								x	x	x
Оптическое переходное излучение		√	√	√							x		
Синхротронное излучение		√	√	√	√	√				x			
Лазерное - комптоновское рассеяние			√	√					√	x			
Поляриметр									√	x			x
Шоттки - детектор	√			√		+	√	√		x			
Измерение эмиттанса				√							x	x	x
Черенковский детектор					√					x			

Основная цель	√
Косвенное использование	+

Рисунок 1.13 – Условная классификация методов диагностики пучков в ускорителях

Далее будут приведено несколько типичных примеров методов диагностики пучка, связанных с теми, что были развиты в этой диссертации. Например, можно упомянуть магнитный спектрометр реального времени на линейном ускорителе для медицинских целей, разработанный Университетом штата Луизиана, который использует блок постоянного магнита 0,57 Тл в качестве дисперсионного элемента. Спектрометр имеет умеренное энергетическое разрешение 0,12 МэВ в диапазоне энергий от 5 до 25 МэВ с минимальной скоростью считывания 1 Гц [32]. Двухдипольный двухэкранный спектрометр Университета Стратклайда для установки по исследованию кильватерного ускорения позволяет проводить измерения энергии с очень высокой точностью ($< 1\%$ при энергии пучка 1 ГэВ) [33].

Особенностью применения магнитного спектрометра на линейном ускорителе СКИФ является необходимость измерений энергии и энергетического разброса пучка в диапазоне энергий 0,6 – 200 МэВ. Еще одним требованием являлась компактность и технологическая простота изготовления прибора. К спектрометру не предъявлялись напряженные требования с точки зрения точности измерений, так как предназначением прибора являлся контроль за стабильностью работы линака, т.е. поддержание штатного режима работы ускорителя. В связи с этим была выбрана схема прибора с поворотом электронов в поперечном магнитном поле на угол в пределах 6,5 – 22,6 градусов, что не позволяет с высокой точностью измерять энергетический разброс при $E_b \geq 50$ МэВ. Для этих целей предложен метод, описанный в главе 2.2.

Современный уровень развития люминофорных экранов демонстрирует конструкция, предложенная на FLASH (DESY, Гамбург) в 2013 году для исследования поперечного профиля электронного пучка на XFEL. Достигнутое пространственное разрешение монитора лучше 22 мкм, что достаточно для целей экспериментов [34]. Предельное пространственное разрешение люминофорного экрана $\sigma_y = 1,44$ мкм достигнуто также в DESY [35] с использованием кристалла LYSO:Ce толщиной 200 мкм.

Поперечные размеры пучка линака СКИФ составляют $\sigma_{x,y} \approx 2-3$ мм. Поэтому, чтобы получить пространственное разрешение около 0,1 мм, оправданно использование экранов из керамики Chromax либо люминофора Р43. Единственным жестким требованием является вакуумная гигиена при изготовлении люминофорного датчика. Более подробно особенности конструкции люминофорных датчиков рассмотрены в главе 2.2.

В качестве примера использования монитора синхротронного излучения можно привести эксперименты в лаборатории им. Ферми (США) [36]. Здесь, с помощью сикроскана, работавшего на частоте 117,3 МГц удалось измерить длины пучков с зарядами в диапазоне от 0,5 нКл до десятков электронов с временным разрешением около 8 пс. ИЯФ СО РАН также имеет богатый опыт создания оптических комплексов диагностики на циклических ускорителях [37-39]. Основные принципы построения этого вида диагностики применены при конструировании аналогичного комплекса на бустере СКИФ. Однако совершенно новой проблемой, с которой не приходилось сталкиваться до сих пор, является краткость цикла работы бустера. Оптическая диагностика с использованием СИ должна произвести несколько десятков измерений профилей пучка за время в несколько сот миллисекунд. Приобретение опыта работы в таких условиях и формулирование методических требований к диагностике осуществлялось на ускорителе ВЭПП-3.

Различные виды излучения, возникающие при взаимодействии заряженной частицы с веществом или поверхностью использовались для исследования продольного профиля пучка заряженных частиц на многих установках [40-43]. Практически все эти методы основаны на восстановлении продольного распределения сгустка из зарегистрированного спектра излучения и связаны с необходимостью продолжительных измерений с последующей модельно-зависимой математической обработкой. На этом фоне выгодно выделяется черенковское излучение, с помощью которого возможно достигнуть субпикосекундного временного разрешения [44] за одно измерение. Правда, при этом диагностика становится деструктивной. Заметим, что интерес к использованию черенковского

излучения для исследования продольного профиля пучка связан преимущественно с пикосекундными и субпикосекундными временными интервалами и ультрарелятивистскими энергиями [45].

Продольный профиль пучка линейного ускорителя СКИФ требовалось измерять в широком диапазоне энергии и длительности: от 0,6 МэВ и несколько сот пикосекунд после ВЧ пушки до 50 МэВ и 5-6 пикосекунд (FWHM) на выходе из ускорителя. Кроме того, для настройки ускорителя требовалась информация о продольном профиле пучка при энергии $E_b = 3$ МэВ, где его длительность также, по расчетам, должна составлять 5-6 пикосекунд (FWHM). Таким образом, пучок из ВЧ пушки имел энергию, сравнимую с пороговой для эффекта Черенкова в кварце: при показателе преломления $n = 1,46$ величина $\beta > 0,6849$, что соответствует $E_{cr} = 190,3$ кэВ. В то же время пучок, ускоренный до $E_b > 50$ МэВ, имеет длительность, предъявляющую серьезные требования к оптической системе и регистрирующему прибору (стрик-камере).

Одним из основных требований, предъявляемых к методу измерения любых параметров пучка заряженных частиц, является надежность и однозначность получаемых результатов. Иными словами, при создании диагностического комплекса нового ускорителя приходится отдавать приоритет хорошо апробированным методикам, адекватным поставленной задаче. Идеальным вариантом является перенос на новую установку ранее отработанных диагностик с внесением необходимых усовершенствований. Если же такой возможности нет, то желательно осуществить тщательное численное моделирование нового метода диагностики для оценки пределов его применимости. Немаловажную роль играет стоимость диагностики, которая должна быть адекватна решаемой задаче. Все эти соображения принимались во внимание при проектировании диагностического комплекса линейного ускорителя СКИФ и оптической диагностики бустера СКИФ.

1.3 Источник СИ поколения 4+ СКИФ в Новосибирске

Проект СКИФ начал осуществляться в феврале 2018 г., к декабрю 2024 г. планируется получить первый пучок в бустере, а в декабре 2025 г. будут поставлены первые шесть экспериментальных станций [46]. СКИФ расположен в наукограде Кольцово, неподалеку от Академгородка г. Новосибирска, где работает более 40 научно-исследовательских институтов, проводящих исследования в области физики, химии, биологии, медицины, теории конденсированного состояния вещества, геологии и др. Экспериментальные методы, основанные на использовании синхротронного излучения, хорошо развиты во всех этих областях науки. Создание СКИФ будет способствовать развитию междисциплинарности научных исследований. Энергия накопителя СКИФ равна 3 ГэВ, а расчетный горизонтальный эмиттанс составляет около 75 пм·рад при нулевом токе и нулевом коэффициенте связи бетатронных колебаний. Периметр накопителя составляет около 500 м, что заметно меньше, чем у большинства однотипных источников синхротронного излучения (рисунок 1.14). Основные параметры комплекса приведены в таблице 1.1 [47], [48]. На накопителе запланированы 30 каналов вывода СИ, в том числе 14 каналов излучения от вигглеров и ондуляторов, 8 каналов жесткого рентгеновского излучения от магнитов 2.1 Тл и 8 каналов мягкого рентгеновского излучения от магнитов 0,52 Тл.

Конфигурация СКИФ включает линейный ускоритель-инжектор с максимальной энергией 200 МэВ (таблица 1.2), канал транспортировки пучка от линейного ускорителя до бустера (LBTL), бустерный синхротрон с максимальной энергией 3 ГэВ периметром 158,7 м (таблица 1.3), и канал транспортировки пучка от бустера до накопителя (BSTL). Накопительное кольцо имеет 16-кратную симметрию и окружность 476 м.

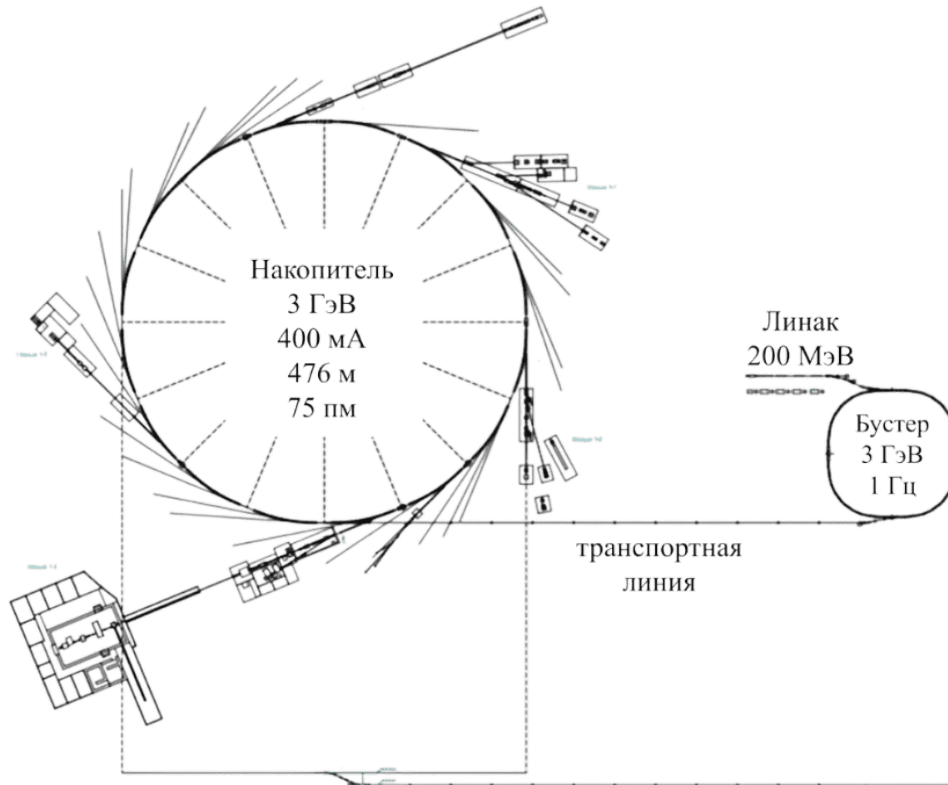


Рисунок 1.14 – Схема комплекса СКИФ [7, 8]

Таблица 1.1 – Основные параметры накопительного кольца СКИФ

Энергия инъекции в основное кольцо	3 ГэВ
Максимальная энергия инъекции	3,15 ГэВ
Частота инъекции в накопитель	1 Гц
Интервал между сгустками	5,6 нс
Время заполнения накопителя электронами от 0 до 400 мА	Не более 1 мин
Эффективность транспортировки заряда от пушки линейного ускорителя к накопителю	Не менее 90%
Горизонтальный эмиттанс при 3 ГэВ	< 70 пм рад
Энергетический разброс	< 0,1%
Незапланированные остановки в год	Не более 0,5%

Таблица 1.2 – Основные параметры линейного ускорителя СКИФ

Энергия электронов	200 МэВ
Максимальная энергия	210 МэВ
Частота выстрелов	1 Гц
Длина последовательностей пучков	до 310 нс
Интервал времени между сгустками в пучке	5,6 нс
Количество электронных сгустков в пучке	до 55
Максимальный заряд в пучке	15 нКл
Заряд одного сгустка	0,27 - 1 нКл
Геометрический эмиттанс при $E_b = 200$ МэВ	150 мкм рад
Разброс энергии при 200 МэВ	Не более 1%
Незапланированные остановки в год	Не более 0,5%

Таблица 1.3 – Основные параметры бустера СКИФ

Периметр кольца	158 м
Энергия инжекции электронов	200 МэВ
Энергия выпускаемых электронов	3 ГэВ
Рабочая частота	1 Гц
Частота ВЧ	352 МГц
Незапланированные остановки в год	Не более 0,4% (или 24 ч в год)
Максимальный заряд	15 нКл
Эффективность инжекции при впуске/выпуске пучка	>75%

Магнитная структура СКИФ состоит из 16 суперпериодов типа 7ВА, она достаточно проста и симметрична, что минимизирует структурные резонансы.

На рисунке 1.15 показаны структурные функции β_x , β_y и дисперсия для суперпериода (1/16). Структурная функция β_x достаточно велика для оптимизации горизонтальной инжекции, а β_y минимизирована, чтобы свести к минимуму влияние вставных устройств на динамику пучка [49].

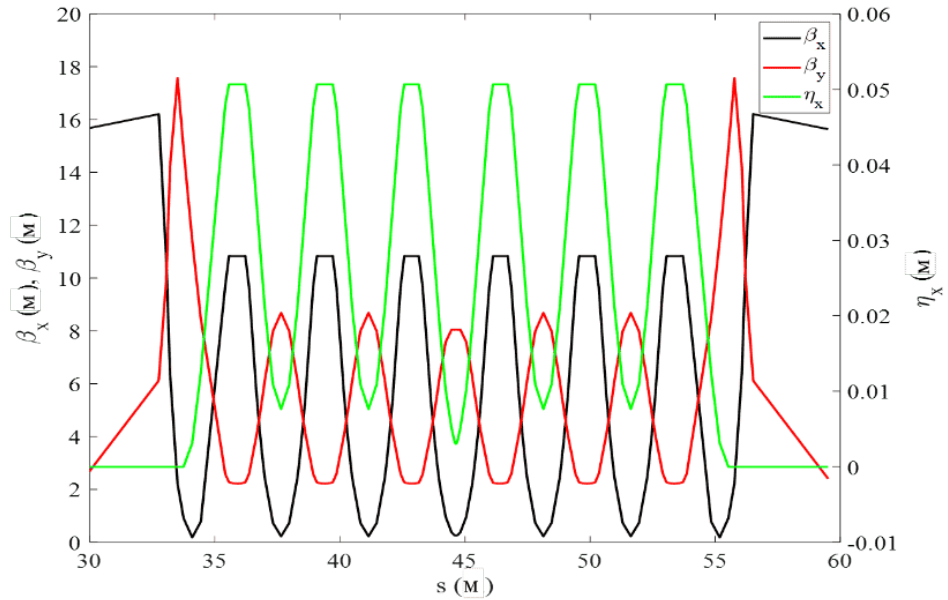


Рисунок 1.15 – Параметры Twiss одного из суперпериодов накопителя

ГЛАВА 2. Проектирование системы диагностики пучка линейного ускорителя на СКИФ

Приведенные в данной главе результаты опубликованы автором совместно с соавторами в работе [3].

2.1 Линейный ускоритель СКИФ

В качестве инжектора источника синхротронного излучения СКИФ используется линейный ускоритель с энергией электронов $E_b = 200$ МэВ, основные параметры которого приведены в таблице 2.1. ВЧ-пушка, группирователь третьей гармоники, предускоритель и система регулярных ускоряющих структур являются основными компонентами линейного ускорителя [50].

Таблица 2.1 – Параметры линейного ускорителя СКИФ

Энергия пучка	200 МэВ
Максимальная энергия пучка	221 МэВ
Частота	1 Гц
Геометрический эмиттанс при $E_b = 200$ МэВ	75 пм·рад
Энергетический разброс, $E_b = 200$ МэВ	$\leq 1\%$ (rms)
Поперечные размеры пучка (в режиме 1 нКл)	$\sigma_x = 1,6$ мм, $\sigma_y = 1,6$ мм ($E_b = 0,72$ МэВ, после СВЧ-пушки) $\sigma_x = 2,2$ мм, $\sigma_y = 2,2$ мм ($E_b = 0,58$ МэВ, в канале группировки) $\sigma_x = 3,5$ мм, $\sigma_y = 3,5$ мм ($E_b = 3,35$ МэВ, после предускорителя) $\sigma_x = 0,9$ мм, $\sigma_y = 0,9$ мм ($E_b = 48$ МэВ, после первой ускоряющей структуры) $\sigma_x = 0,7$ мм, $\sigma_y = 0,7$ мм

Продолжение таблицы 2.1

	$(E_b = 200 \text{ МэВ, на выходе линака})$
Длительность пучка (в режиме 1 нКл)	134 пс ($E_b = 0,72 \text{ МэВ, после СВЧ-пушки}$)
	80 пс ($E_b = 0,58 \text{ МэВ, 1}^{\text{st}} \text{ sensor в канале группировки}$)
	49 пс ($E_b = 0,58 \text{ МэВ, 2}^{\text{nd}} \text{ sensor в канале группировки}$)
	3,7 пс ($E_b = 3,35 \text{ МэВ, после предускорителя}$)
	3,6 пс ($E_b = 48 \text{ МэВ, после первой ускоряющей структуры}$)
	3,6 пс ($E_b = 200 \text{ МэВ, в конце линейного ускорителя}$)

Структура линейного ускорителя, которую предполагается протестировать в первую очередь, показана на рисунке 2.1.

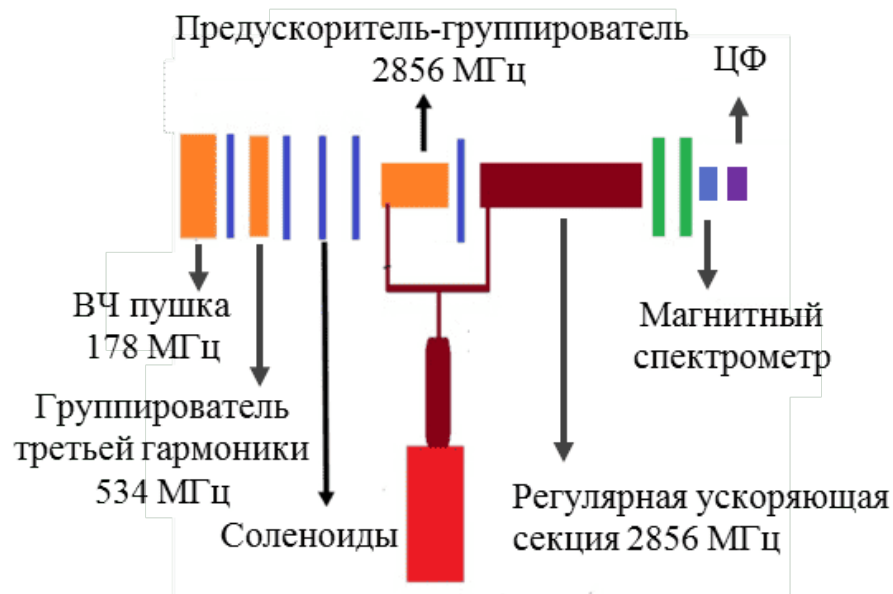


Рисунок 2.1 – Структура линейного ускорителя, первая ступень

Источник электронов основан на ВЧ-пушке 178,5 МГц с термоэмиссионным катодом для получения начального пучка с энергией $E_b = 0,6 \text{ МэВ}$. ВЧ-пушка работает на частоте 178,5 МГц, что является половинной частотой резонатора накопителя (бустера) и 1/16 частоты регулярной ускоряющей структуры 2856 МГц. ВЧ-пушка имеет оксидный термоэмиссионный сетчатый катод, уста-

новленный в полости ВЧ-пушки. Когда фаза ВЧ синусоидального напряжения в резонаторе достигает 40° , триггерный импульс длительностью 1 нс прикладывается к промежутку катод-сетка и генерирует электронный пучок. Пучок ускоряется полем резонатора до энергии $E_b = 600$ кэВ. Пушка работает в импульсном режиме с частотой повторения 1 Гц. Существует возможность использовать более высокую частоту повторения, до 20 Гц.

Система группировки-предускорения используется для ускорения частиц до энергии $E_b = 3$ МэВ, и включает в себя дрейфовый промежуток, структуру предварительного ускорителя-группирователя и группирователь на третьей гармонике 535,5 МГц для уменьшения длительности пучка со 100 до 3 пс, что позволяет получить 1% разброс энергии на выходе из линейного ускорителя.

Регулярная ускоряющая структура, предназначенная для получения пучка с энергией $E_b = 20 - 50$ МэВ, выполнена на основе диафрагмированного волновода с постоянным импедансом с модой колебания $2\pi/3$. Ускоряющая структура запитывается клистроном с импульсной мощностью 50 МВт. Основные компоненты линейного ускорителя СКИФ приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Список основных элементов линейного ускорителя инжектора СКИФ

Название	Описание	Кол-во
Источник электронов	СВЧ пушка с частотой 178,5 МГц	1
Группирующий резонатор	Резонатор группировки с частотой 535,5 МГц	1
Группирователь-предускоритель	Структура на бегущей волне с частотой 2856 МГц с видом колебания $2\pi/3$	1
Ускоряющая структура	Частота 2856 МГц, длина 3 м, структура на бегущей волне с видом колебания $2\pi/3$	5

Продолжение таблицы 2.2

Источник мощности резонатора СВЧ пушки	До 1 МВт	1
Модулятор источника электронов	Частота до 0-178 МГц, длительность 2 нс, амплитуда до -150 В	1
Источник СВЧ мощности резонатора группирователя	Частота 534 МГц, мощность 10 кВт	1
Клистрон	Частота 2856 МГц, мощность 50 МВт	3
Модулятор клистрона	350 кВ высокое напряжение, 120 МВт импульсная мощность	3

Полная версия линейного ускорителя имеет пять ускоряющих структур. Максимальная набираемая энергия в первой структур 53 МэВ, для последующих – 42 МэВ. Суммарная максимальная энергия пучка составляет 221 МэВ.

Контроль параметров пучка на разных этапах строительства, эксплуатации и ремонта требует установки системы диагностики после каждой секции линейного ускорителя как при их вводе в эксплуатацию, так и при штатной эксплуатации устройства.

Для настройки и измерения параметров пучка различных ступеней линейного ускорителя от электронной ВЧ-пушки до выхода ускорителя был разработан комплекс диагностических приборов [3]. В зависимости от параметрических требований линейного ускорителя диагностическая система должна иметь динамический диапазон по энергии от 0,6 до 200 МэВ и измерять длительность пучка от 100 до 3-5 пс FWHM. В комплекс диагностики линака входят восемь люминофорных экранов для измерения поперечных размеров пучка, четыре черенковских датчика для измерения продольного распределения частиц, дипольный магнитный спектрометр для измерения энергии и энергетического разброса пучка, цилиндр Фарадея (ЦФ), а также быстродействующий трансформатор тока (FCT) и мониторы положения пучка (BPM).

Предварительная отладка ускорителя проводилась на стенде, где энергия пучка не превышала 50 МэВ. При этом был задействован практически весь комплекс диагностик. Все экспериментальные результаты, представленные ниже, относятся к измерениям, проведенным на этом стенде. Можно сразу отметить, что все разработанные и примененные диагностики пучка ускорителя справились со своими функциями и в значительной мере способствовали получению проектных параметров установки.

Достижение проектных параметров пучка при монтаже и вводе в эксплуатацию каждого важного узла линейного ускорителя требует различных комбинаций диагностических средств, как показано на рисунках 2.2-2.5 для каждого этапа сборки линака.

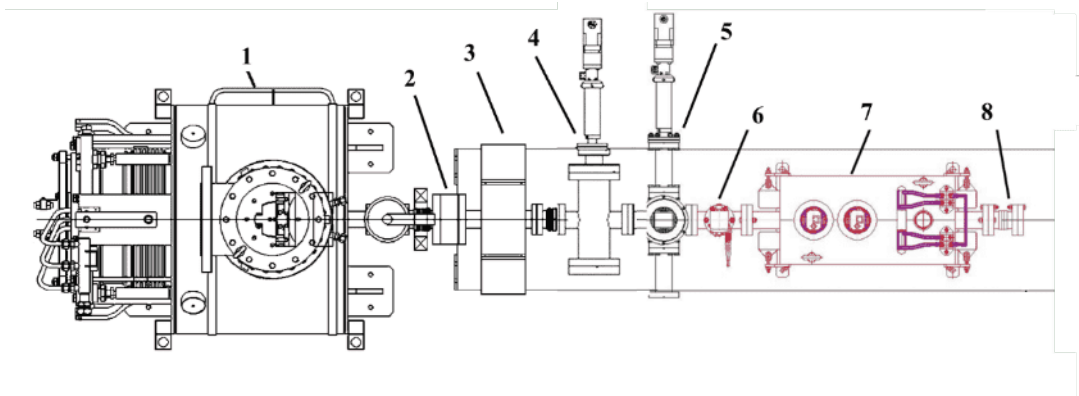


Рисунок 2.2 – Схема измерения параметров пучка после электронной ВЧ-пушки: 1 - ВЧ-электронная пушка, 2 - FCT, 3 - соленоид, 4 - черенковский датчик, 5 - люминофорный экран, 6 - коллиматор, 7 - спектрометр, 8 - цилиндр Фарадея

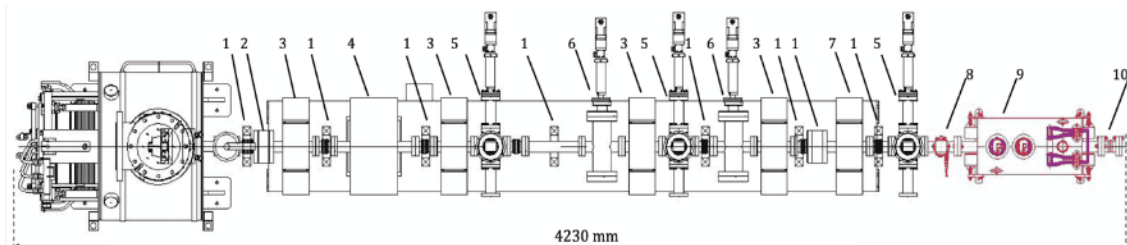


Рисунок 2.3 – Схема измерения параметров пучка в канале группировки: 1 - корректор, 2 - FCT, 3 - соленоид, 4 - резонатор третьей гармоники, 5 - люминофорный экран, 6 - черенковский датчик, 7 - последний соленоид с ВЧ- в

нем резонаторный датчик, 8 - коллиматор, 9 – спектрометр, 10 - цилиндр Фарадея

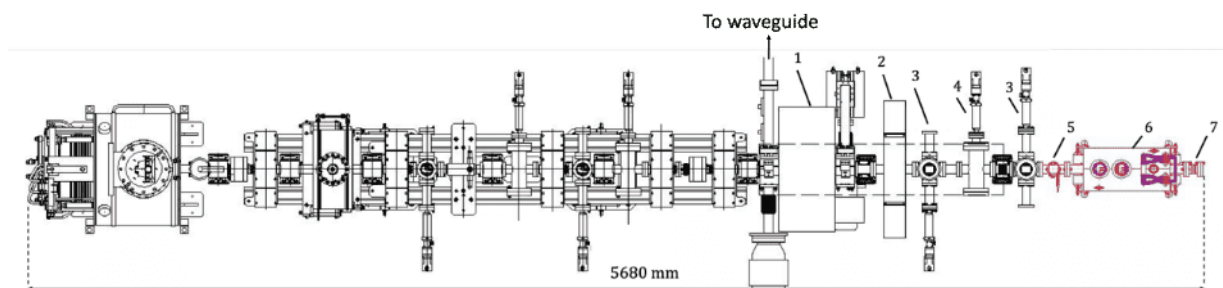


Рисунок 2.4 – Схема измерения параметров пучка после предускорителя: 1 - предускоритель, 2 - соленоиды, 3 - люминофорный экран, 4 - черенковский датчик, 5 - коллиматор, 6 - спектрометр, 7 - цилиндр Фарадея

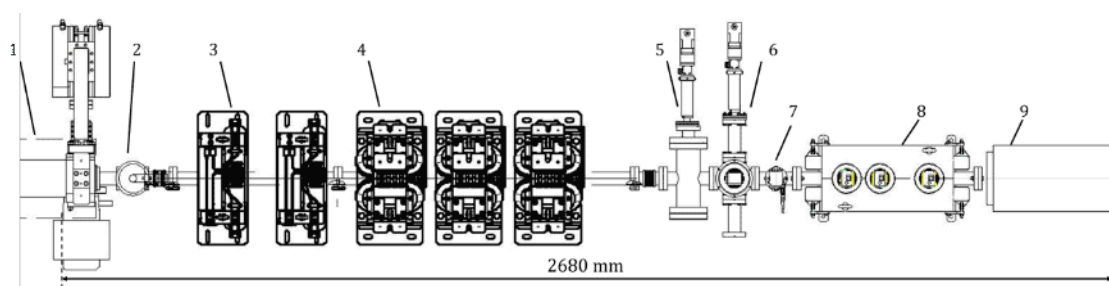


Рисунок 2.5 – Схема измерения параметров пучка после первой ускоряющей секции: 1 - ускоряющая конструкция, 2 - вакуумный затвор, 3 - корректор, 4 - квадруполь, 5 - черенковский датчик, 6 - люминофорный экран, 7 - коллиматор, 8 - спектрометр, 9 - цилиндр Фарадея

Особенности конструкции диагностических компонентов (теоретический анализ, численное моделирование) и разработка программного обеспечения будут представлены в последующих разделах.

В таблице 2.3 представлены энергия и энергетический разброс пучка линака, которые должны быть измерены при помощи магнитного спектрометра. Исходно предполагалось, что спектрометр будет соединяться с вакуумной камерой ускорителя после ВЧ пушки, группирователя и ускоряющей секции по мере прогресса в запуске установки.

Таблица 2.3 – Расчетные энергии и энергетический разброс пучка в точках измерения с помощью магнитного спектрометра

Энергия	662,8 кэВ	3,002 МэВ	47,39 МэВ	200 МэВ
Энергетический разброс	82,42 кэВ	164,9 кэВ	435,1 кэВ	1%

2.2 Люминофорные экраны

Люминофорные экраны являются деструктивной диагностикой, но в силу большой наглядности предоставляемой информации они часто используются для наблюдения за поперечным профилем пучка и его положением в сечении вакуумной камеры в режиме онлайн. Люминофорные экраны на стенде линака использовались для измерения поперечного распределения пучка с пространственным разрешением около 0,1 – 0,15 мм. На рисунке 2.6 показано положение люминофорных экранов в прототипе линейного ускорителя и соответствующие поперечные размеры пучка. На стенде линака использовалось 4 люминофорных экрана, и всего их будет 8 на полноразмерном линейном ускорителе.

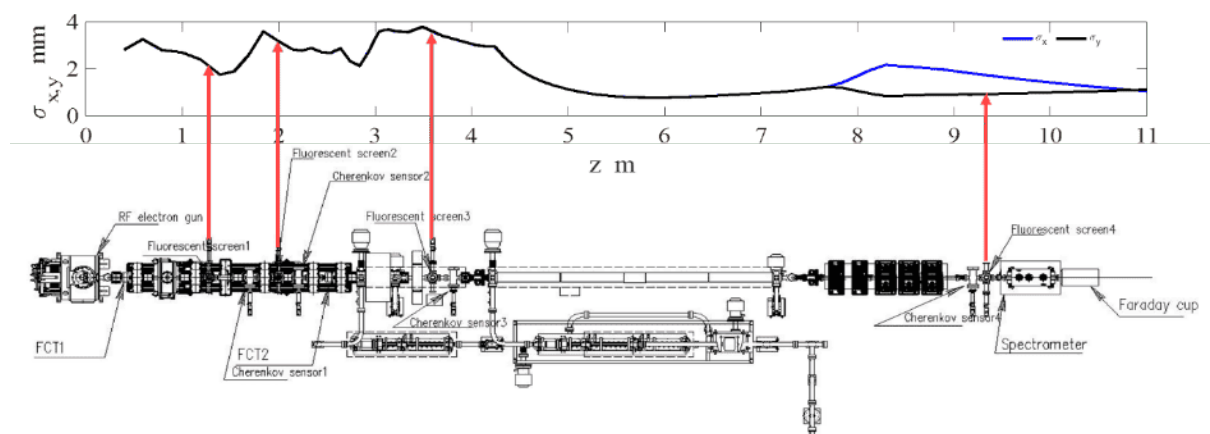


Рисунок 2.6 – Положение люминофорных экранов и поперечные размеры пучка на стенде линейного ускорителя. Синяя кривая: σ_x ; черная кривая: σ_y

Принципиальная схема конструкции люминофорного экрана показана на рисунке 2.7. Люминофорный экран состоит из сцинтиллятора, испускающего свет под действием частиц пучка, фотодетектора, регистрирующего этот свет и соответствующей электроники. Форма светового пятна соответствует форме поперечного сечения пучка. Благодаря относительно простой конструкции практически все ускорительные установки не обходятся без этого вида диагностики [51].

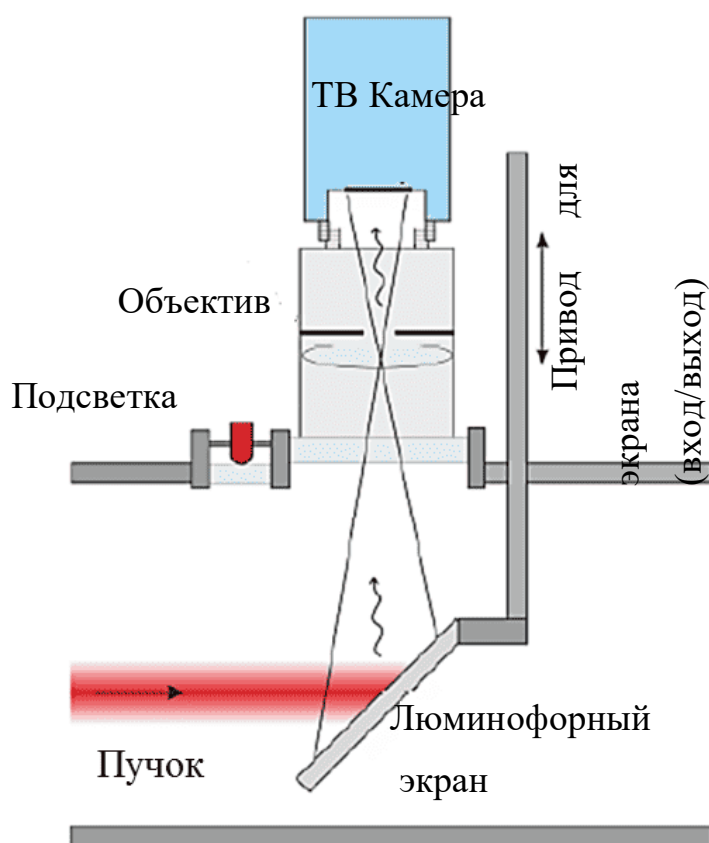


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема конструкции люминофорного экрана

3D-модель устройства люминофорного экрана, разработанного для линейного ускорителя СКИФ, показана на рисунке 2.8. Люминофорный экран (подробнее см. 2.2.1.) размером около $2,5 \times 2,5$ см и толщиной 1 мм расположен под углом 45° к траектории пучка, а его движение контролируется шаговым двигателем—линейным актуатором САНВ-10 (подробнее см. 2.2.2, и рисунок 2.9).

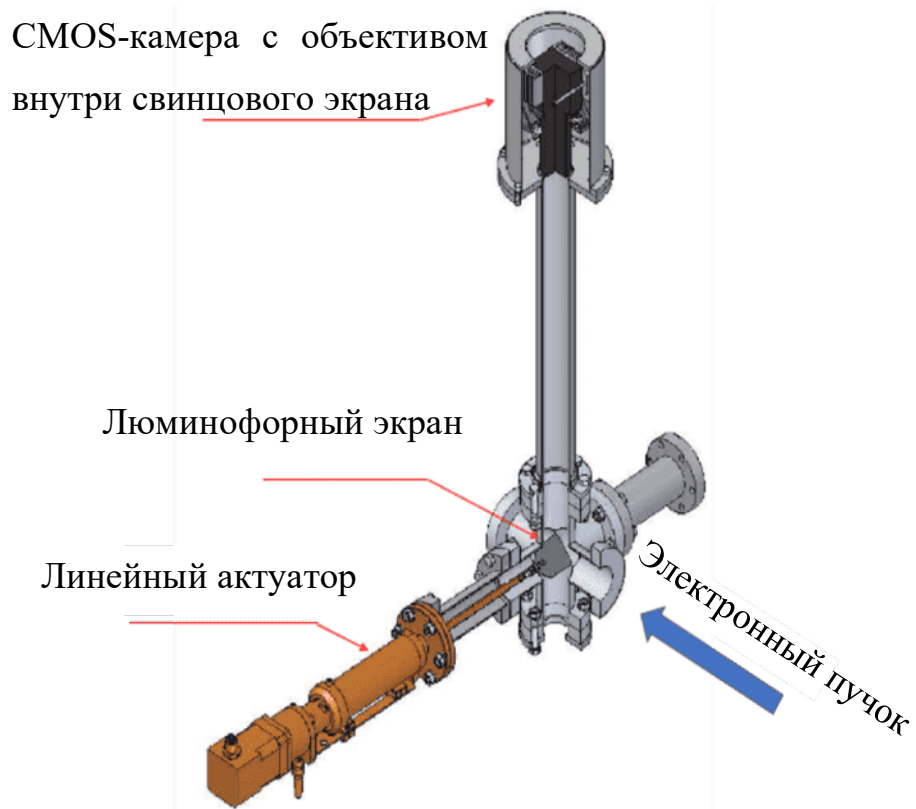


Рисунок 2.8 – Схема конструкции люминофорного экрана на линейном ускорителе СКИФ

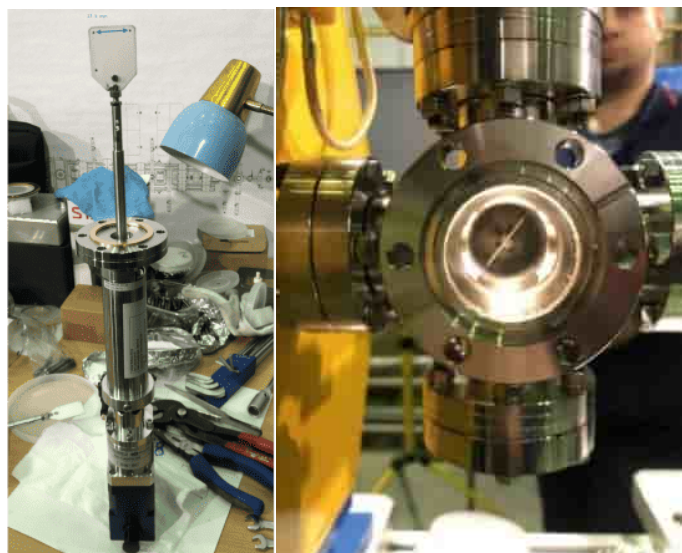


Рисунок 2.9 – Люминофорный экран, закрепленный на линейном актуаторе САНВ-10 (слева). Сборка люминофорного экрана в конструкции ускорителя (справа)

Перемещение актуатора рассчитано таким образом, что центр экрана совпадает с центром вакуумной камеры при срабатывании концевого выключателя, т.е. при максимально возможном выдвижении штока актуатора. Противоположное положение соответствует «парковке» экрана. Координаты промежуточных положений при движении экрана выводятся на монитор управляющей программой.

Изображение пучка фиксируется цифровой CMOS-камерой MER-131-75GM (подробнее см. 2.2.3.), расположенной за пределами медианной плоскости ускорителя и экранированной слоем свинца для защиты от радиационного повреждения. Изображение люминофорной мишени в вакуумной камере показано на рисунке 2.10, ее подсветка осуществляется из смотрового окна снизу. Расчетная глубина резкости для полной апертуры объектива с относительным отверстием $D = 2,8$ составляет 15 мм при пространственном разрешении 0,03 мм. Этого достаточно для точных измерений поперечных размеров пучка в центре экрана, но при экспериментах следует учитывать некоторое размытие, возникающее за пределами этой области.

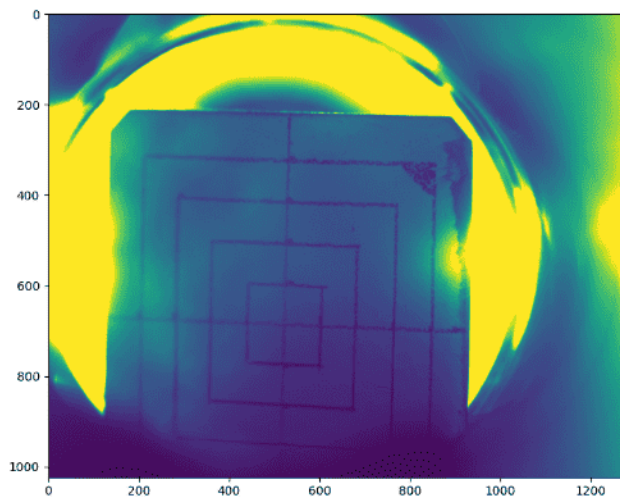


Рисунок 2.10 – Люминофорный экран, наблюдаемый камерой, без пучка

2.2.1 Люминофорная мишень

Ускоренные электроны взаимодействуют с люминофором, который испускает фотоны. Люминесцентные среды можно условно разделить на три категории: неорганические люминофоры, органические люминофоры и газообразные люминофоры. Органические люминофоры из-за плохих вакуумных характеристик и плохой радиационной стойкости не используются для записи профилей пучка в практических приложениях. Неорганические люминофоры имеют широкую спектральную полосу, которая может охватывать диапазон от ультрафиолетового до красного света, и, учитывая характеристики «эффективности», «спектра излучения» и «времени затухания люминофора», неорганический люминофор больше подходит для использования в диагностике пучка. Световой поток люминофора в широких пределах линейно пропорционален заряду пучка, как показано на рисунке 2.11 [52].

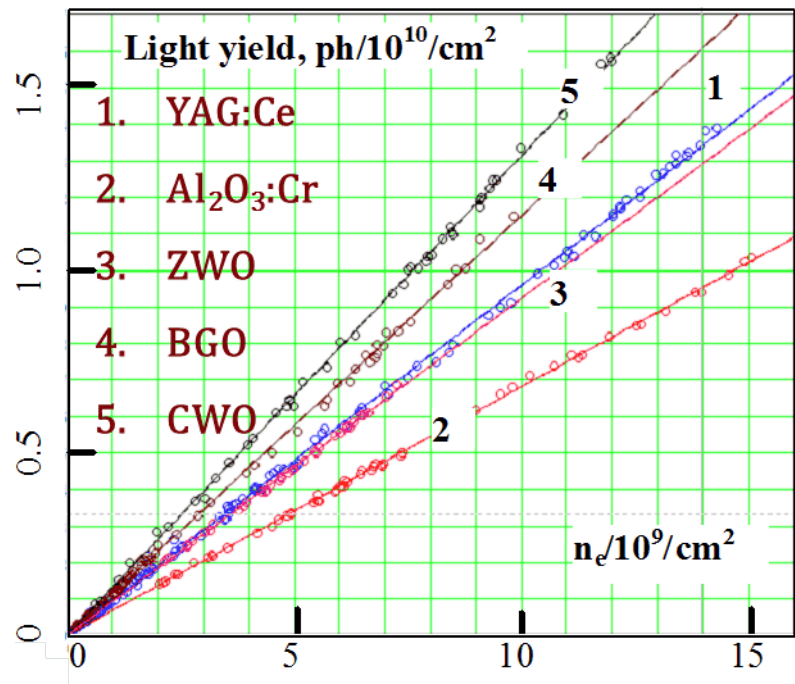


Рисунок 2.11 – Зависимость светового потока кристаллического люминофора от заряда падающего на него пучка

Люминофоры, используемые для визуализации высокоэнергичных частиц, имеют стандартизированные обозначения: буква «Р», за которой следует цифра

[53-55]. Наиболее подходящий тип люминофора обычно выбирается по трем критериям: эффективность, спектр излучения и время затухания люминесценции. Сравнение производительности нескольких популярных люминофоров приведено в таблице 2.4. Чем выше эффективность люминофора, тем медленнее падает его интенсивность после возбуждения. Типичные коэффициенты преобразования для используемых люминофорных экранов составляют от 20 до 200 фотонов на электрон в зависимости от типа люминофора и энергии электронов. При проектных параметрах линака СКИФ даже нижняя граница коэффициента преобразования обеспечивает поток фотонов, более чем достаточный для надежной регистрации поперечного профиля пучка. На практике, световой поток позволял регистрировать даже темновые токи из ВЧ пушки. При работе с пучком требовалось подбирать время экспозиции CMOS камеры так, чтобы величина сигнала оставалась в пределах ее динамического диапазона.

Таблица 2.4. Параметры некоторых порошкообразных люминофоров

Тип	Состав	Эффективность (фотонов/ электрон)	Световое излучение	Время затухания	
				от 90 % до 10 %	от 10 % до 1 %
P43	$Gd_2O_2S:Tb$	20	Зеленый/ 545 нм	1 мс	1,6 мс
P46	$Y_3Al_5O_{12}:Ce$	6	желтый - зеленый/ 530 нм	300 нс	90 мкс
P47	$Y_2SiO_5:Ce,Tb$	4	Сине- белый/ 400 нм	100 нс	2,9 мкс

Двумя наиболее часто применяемыми для визуализации пучков заряженных частиц порошкообразными люминофорами экранами являются P43 и P46 (рисунок 2.12). Высокая светоотдача люминофора P43 и размер зерна порядка нескольких микрон обеспечивает хорошую чувствительность экрана и его высокое пространственное разрешение. Кроме того, P43 слабо чувствителен к рентгеновскому излучению. Люминофорные экраны готовили путем нанесения

частиц люминофора на подложку из нержавеющей стали методом медитации. В качестве связующего использовался раствор жидкого стекла (канцелярского клея). Характеристики люминофора Р43 представлены в таблице 2.5 [54], [56], [57].

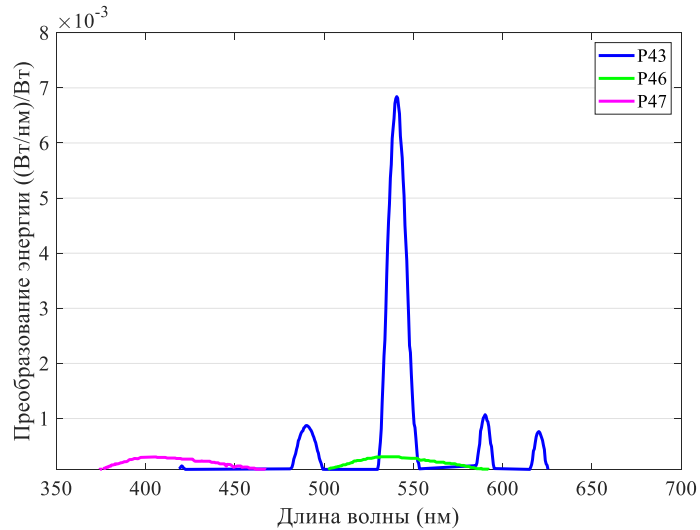


Рисунок 2.12 – Световая эффективность различных люминофорных порошков

Таблица 2.5 – Параметры люминофора Р43

Абсолютный световыход, фотонов/МэВ	6×10^4
Плотность, г/см ³	7,3
$Z_{\text{эфф}}$	62
Показатель преломления	2
$\lambda_{\text{мах}}$, нм	550
Коэффициент ослабления собственного излучения, см ⁻¹	0,6
Радиационная стойкость, рад	10^7
Время высвечивания, мкс	~1000
Послесвечение, % через 3 мс	1

Р43 является наиболее ярким среди коммерчески доступных люминофорных экранов, но его существенный недостаток состоит в сравнительно сложной процедуре нанесения на подложку. Существует полупромышленная технология осаждения порошка методом электрофореза [58], позволяющая получить

люминофорные экраны с хорошими вакуумными свойствами, но ее не было в нашем распоряжении. Та же кустарная процедура, к которой прибегали мы, была сопряжена с низким полезным выходом готовых экранов. Основные проблемы возникали на этапе сушки осажденного на подложку порошка – из-за причин, которые сложно было идентифицировать, поверхность люминофорного слоя покрывалась трещинами и отставала от подложки. Поэтому мы приняли решение перейти на использование керамических люминофоров Chromox.

Основные оптические свойства люминофорных экранов Chromox приведены в таблице 2.6 [59]. Они изготовлены из глиноземной керамики, слегка легированной оксидом хрома (Al_2O_3 (99,5%) + Cr_2O_3), дополнительные физические свойства см. таблице 2.7. Этот тип экрана широко используется в диагностике пучков высоких энергий, он имеет превосходные механические свойства его прочные физические свойства и выдерживает воздействие пучков высоких энергий.

Таблица 2.6 – Оптические/сцинтилляционные свойства Chromox

Длина волны – максимум излучения	нм	691; 694
Время затухания	нс	6,7; 3,4
Выход фотонов	ф/МэВ	5×10^4
Коэффициент затухания @693 нм	см^{-1}	8

Таблица 2.7 – Физические свойства

Химическая формула		Al_2O_3 (99,5%) + Cr_2O_3
Размер зерна	гм	10 - 15
Пористость	%	0
Плотность	г/см^3	3,85
Температура - Макс. Операционная	$^{\circ}\text{C}$	1600

В процессе изготовления люминофорных экранов из заготовок, приобретенных у компании Chromox, было выяснено, что практически аналогичными свойствами обладает российская керамика ВК95-1 (старое обозначение 22 ХС),

но при этом она на порядок дешевле. Более того, размеры пластин, в которых поставляется потребителю Chromox и ВК-95-1, полностью совпадают.

2.2.2 Линейный актуатор САНВ-10

Внешний вид высоковакуумного линейного актуатора показан на рисунке 2.13, размер фланца CF35, длина ход 50 мм, точность 10 мкм с ручным управлением, 1 мкм с электроприводом, производства компании «UHV Design» [60]. Шаговый двигатель актуатора управлялся через контроллер компании «Электропривод» с помощью специально разработанного программного обеспечения.



Рисунок 2.13 – Внешний вид линейного актуатора САНВ-10

2.2.3 Цифровая камера CMOS

В цифровой камере MER-131-75GM (рисунок 2.14) используется 1/2-дюймовый фоточувствительный CMOS-чип PYTHON1300 Global Shutter. Эта камера имеет матрицу 1280×1024 и гигабитный Ethernet-интерфейс. В полном разрешении скорость съемки достигает 75 кадров в секунду. Основные технические параметры приведены в таблице 2.8 [61].

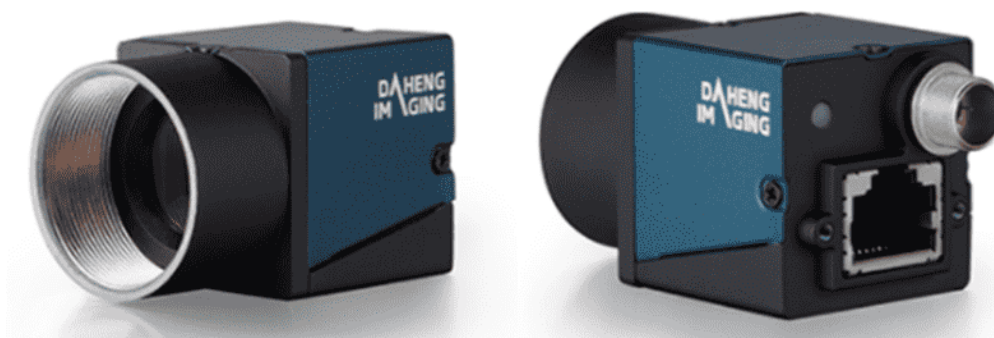


Рисунок 2.14 – Внешний вид цифровой камеры MER-131-75GM

Таблица 2.8 – Параметры MER-131-75GM

Разрешение	1280 × 1024 ячеек
Макс. частота кадров при полном разрешении	75 кадров/сек
Датчик	1/2" PYTHON1300 Global shutter CMOS
Размер пикселя	4,8 мкм
АЦП	8 бит, 10 бит
Интерфейс передачи данных	GigE
Спектр	черно-белый
Отношение сигнал/шум	38,03 дБ
Требования к питанию	12 В постоянного тока
Потребляемая мощность	<3 Вт при 12 В постоянного тока
Рабочая температура	0°C ~ +45°C
Температура хранения	-20°C ~ +70°C
Рабочая влажность	10% ~ 80%
Механический размер (Ш×В×Д)	29 мм × 29 мм × 29 мм (исключая длину C-mount)

2.3 Магнитный спектрометр

Спектрометр предназначен для измерения энергии и энергетического разброса пучка. Цель состояла в том, чтобы разработать компактное устройство с умеренным, но достаточным энергетическим разрешением в широком диапазоне энергий. Магнитный спектрометр состоит из дипольного магнита, люминофорных экранов, проекционной оптики и цифровых камер CMOS. Прибор использовался для измерения энергии и энергетического разброса пучка вдоль линейного ускорителя (для пучков с энергией от 0,6 до 200 МэВ), в том числе для настройки прототипа линейного ускорителя до энергии 50 МэВ [62].

2.3.1 Конструкция спектрометра

Схема спектрометра показана на рисунке 2.15.

Пучок ускорителя, сечение которого ограничивается коллиматором на входе в дипольный магнит, отклоняется в магнитном поле и попадает на один из люминофорных экранов, расположенных внутри магнита. Свечение экрана регистрируется цифровой камерой, такой же, как и в люминофорных датчиках (см. 2.2.2). Все три встроенных мишени люминофора изготовлены из материалов, аналогичных материалу люминофорного детектора, см. 2.2.1, как показано на рисунке 2.16. Экраны расположены на расстоянии 100, 200 и 350 мм от входа магнита. Форма и координата отпечатка пучка на экране позволяют определить энергию и энергетический разброс пучка.

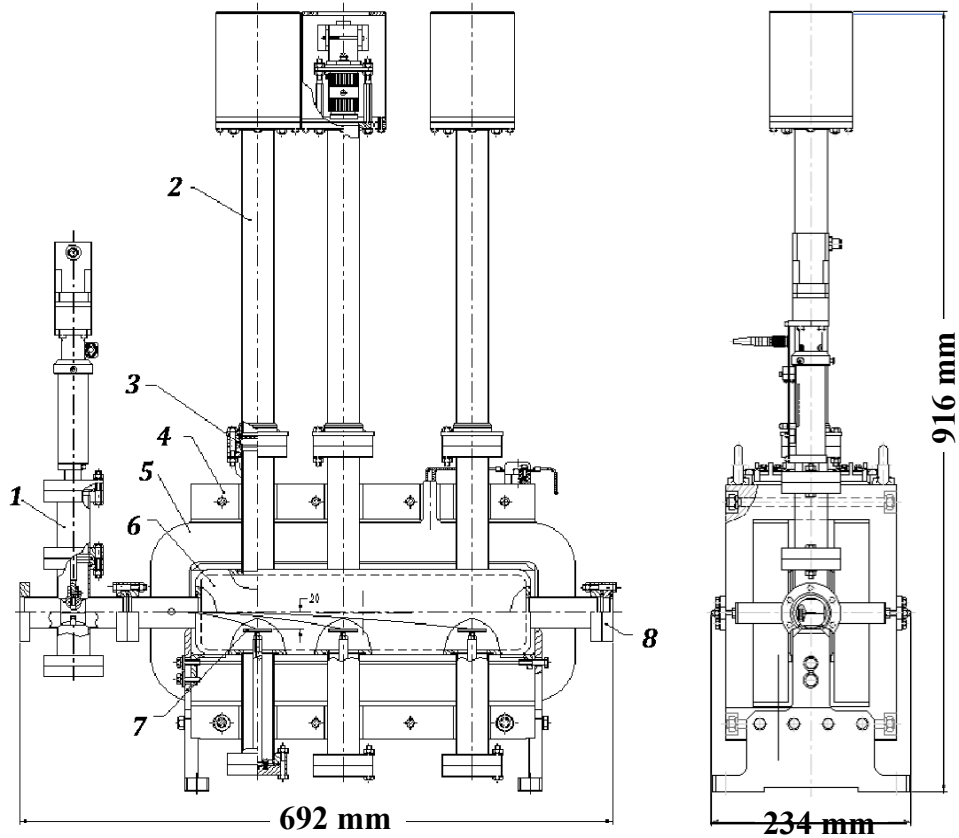


Рисунок 2.15 – Схема спектрометра: 1 - коллиматор пучка, управляемый шаговым двигателем, 2 - блок цифровой камеры, 3 - вакуумное окно, 4 - магнитопровод, 5 - катушки, 6 - вакуумная камера, 7 - пластина с нанесенным люминофором, 8 - выходное окно из титана



Рисунок 2.16 – Три люминофорных экрана с фланцами перед установкой в магнитном спектрометре

Коллиматор магнитного спектрометра

Поперечное сечение пучка ограничено каналом с шириной 0,5 мм, проходящим через медный коллиматор толщиной 3 см (рисунок 2.17). Коллиматор влияет на энергетическое разрешение и чувствительность спектрометра.

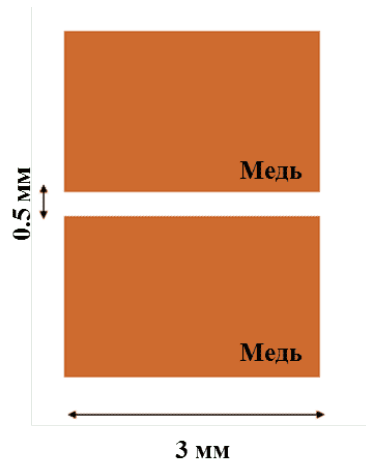


Рисунок 2.17 – Схема коллиматора на входе спектрометра

Можно оценить эффективную ширину щели с учетом рассеяния пучка в коллиматоре [63]:

$$\xi = \frac{A}{\rho Z^{1/2}}, \quad (2.1)$$

где ξ — безразмерный коэффициент, A — атомный вес, Z — атомный номер, ρ — плотность вещества. Для коллиматора из меди $A = 63,546$, $Z = 29$, $\rho = 8,96$ г/см³, что дает эффективную ширину щели 0,66 мм. Это уширение слабо влияет на энергетическое разрешение магнитного спектрометра. Более точно влияние рассеяния в коллиматоре было учтено при численном моделировании. Фактически, рассеяние станет заметным лишь при энергии пучка $E_b = 50$ МэВ и более. Электроны с энергиями до 0,6 и 3 МэВ будут полностью поглощаться в коллиматоре.

Коллиматор управляется высоковакуумным актуатором с шаговым двигателем той же модели, что и в люминофорном датчике, и может полностью выводиться из сечения вакуумной камеры.

Дипольный магнит

Габариты дипольного магнита 330×180×450 мм. Внешний вид диполя показан на рисунке 2.18. Конструкция магнита сводит к минимуму утечку магнитного потока и максимизирует диапазон области хорошего поля, обеспечивая при этом достаточный динамический диапазон по напряженности магнитного поля. Площадь хорошего поля имеет поперечное сечение 80 (x) × 40 мм (y) × 350 мм (z). При магнитном поле 2,2 кГс общий ток в катушке составляет 3,45 кА. Смоделированное распределение напряженности магнитного поля показано на рисунке 2.19. Точная карта магнитного поля, полученная на стенде магнитных измерений, приведена в Приложении А.

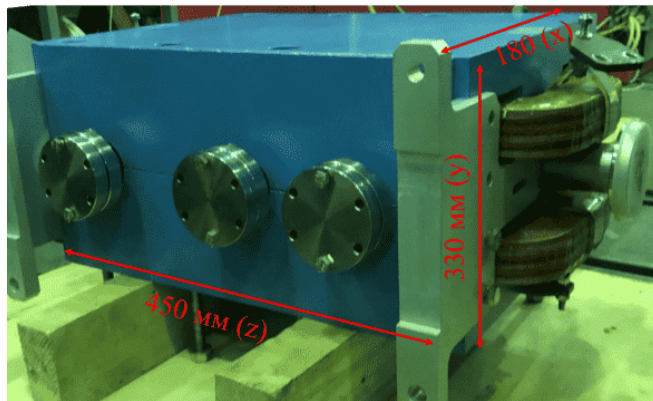


Рисунок 2.18 – Дипольный магнит спектрометра

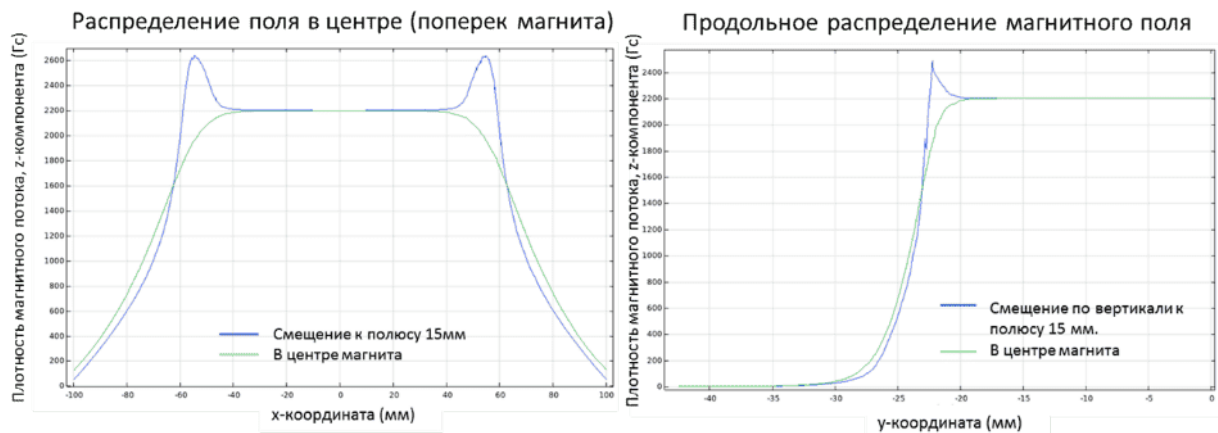


Рисунок 2.19 – Расчетное продольное распределение магнитного поля, ток в катушке 53 А

Магнитные измерения были произведены на экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН. Зонд, использовавшийся при измерениях, содержал 17 расположенных рядом датчиков Холла с общей шириной от -78,002 до 74,4096 мм (поперечная координата (x) датчиков Холла относительно геометрического центра магнита). Датчик управлялся шаговым двигателем и проходил через срединную плоскость магнита ($y = 0$) с постоянной скоростью, аналогичные измерения производились для плоскостей с координатами $y = \pm 15$ мм. Диапазон измерений по координате z составлял $-40 \sim 40$ см (продольная координата относительно геометрического центра магнита). Группа датчиков Холла и измерительное устройство показаны на рисунке 2.20.

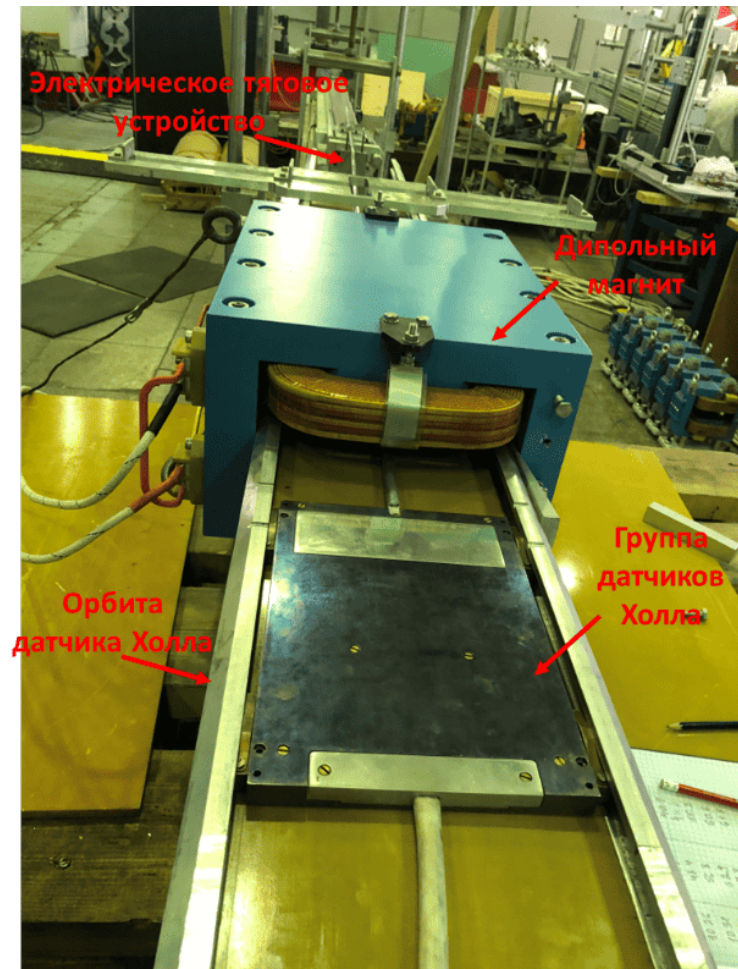


Рисунок 2.20 – Дипольный магнит с датчиками Холла на стенде

Выяснилось, что конструкция магнита, в которой не было предусмотрено охлаждение, не позволяет проводить длительные измерения при энергии пучка

линака $E_b = 200$ МэВ. На рисунке 2.21 показано изменение температуры во времени при токе, соответствующем полю $B = 1,5$ кГс. Температура катушек повышается от комнатной до примерно 75°C в течение 40 минут, поэтому при использовании магнитного спектрометра для измерения пучка с $E_b = 200$ МэВ необходимо дополнительное охлаждение устройства.

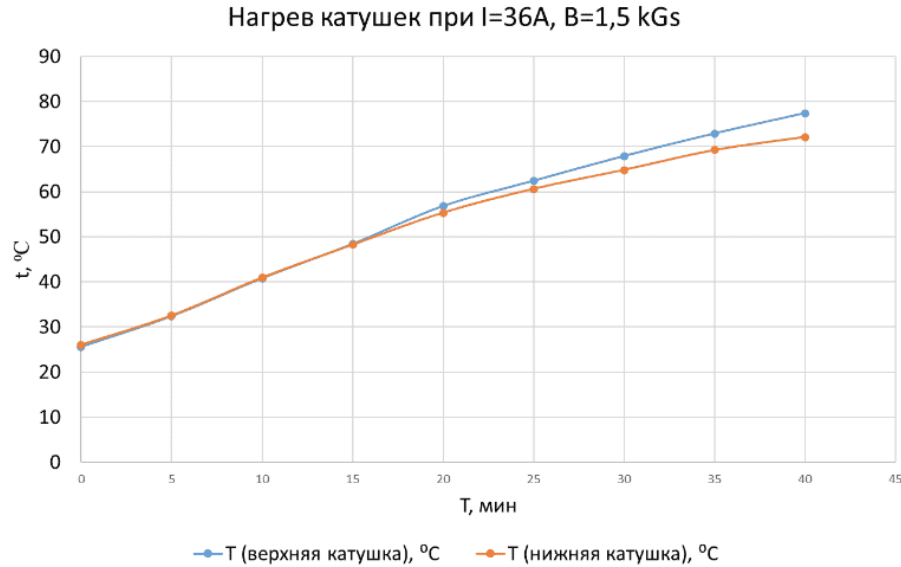


Рисунок 2.21 – Кривая зависимости температуры катушки от времени при токе в обмотке $I = 36$ А

Результаты измерений распределения магнитного поля при разных токах в обмотке магнита приведены в Приложении А и таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты измерения дипольного магнита

I, А	H, Гс	$\int Bdz$, Гс *см	L_{eff} , см	B/I	$\int Bdz/I$
0	0,1	-4	-29,91		
2	83,8	3707	44,26	41,9	1854
5	210,9	9354	44,36	42,2	1871
9	380,9	16912	44,39	42,3	1879
13	551,2	24477	44,41	42,4	1883
36	1531,6	68022	44,41	42,5	1890
50	2127,7	94511	44,42	42,6	1890

Кривые локальной однородности и интегральной однородности магнитного поля показаны на рисунках 2.22 и 2.23. Неоднородность поля при $B = 83,8$ Гс относительно велика, но общая однородность составляет 10^{-3} , что согласуется с данными моделирования. Выявленная неоднородность будет учтена при расчетах аппаратной функции спектрометра, однако понятно, что ее величина практически не скажется на точности измерений энергии пучка.

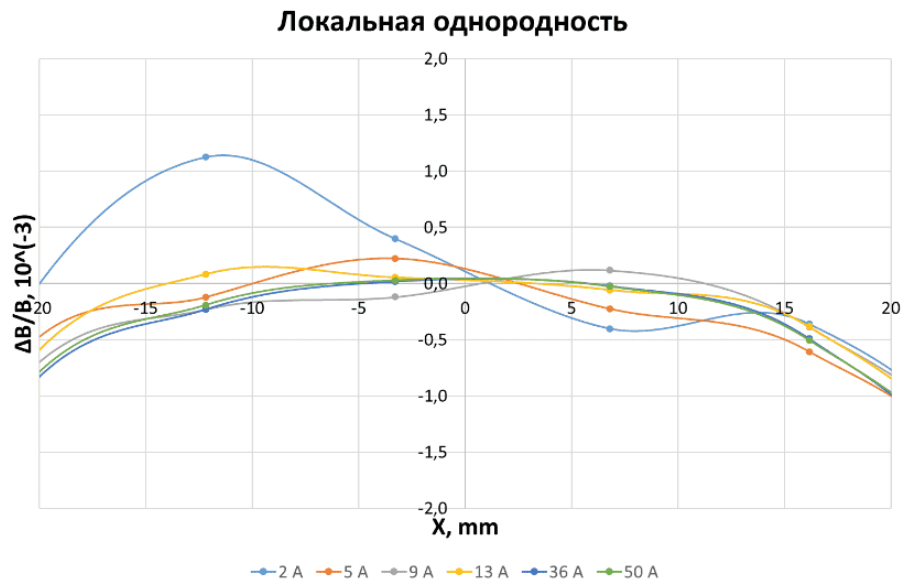


Рисунок 2.22 – Относительная однородность магнитного поля в поперечном сечении при различных токах в обмотке магнита

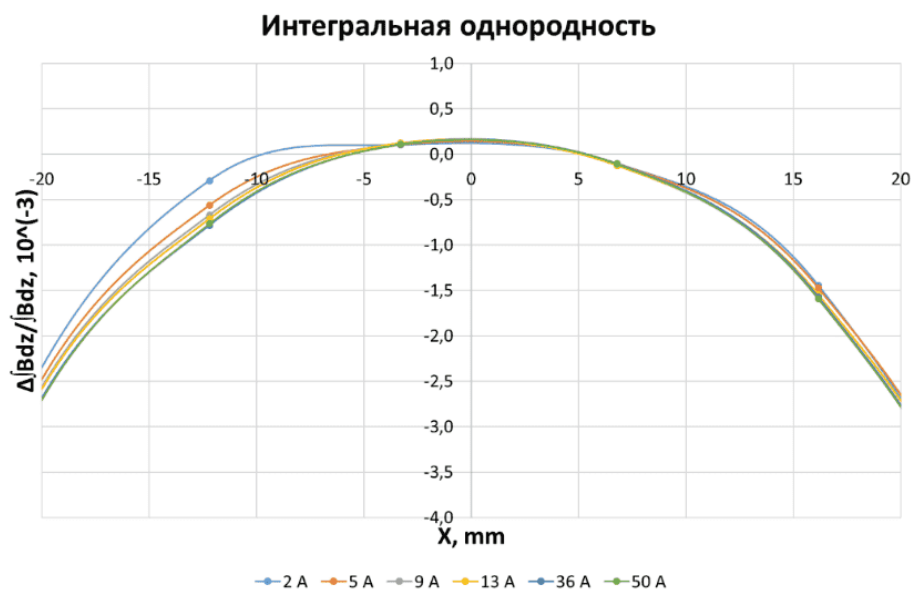


Рисунок 2.23 – Распределения интегральной однородности магнитного поля при различных токах в обмотке магнит

2.3.2 Принцип действия спектрометра

Заряженные частицы с разной энергией имеют разные траектории отклонения в магнитном поле, и магнитный спектрометр разработан на основе передаточной функции «положение-энергия». Эта функция связывает положение электрона в плоскости люминофорного экрана с его энергией. Рассмотрим геометрическую модель, описывающую геометрию дипольного магнита и траекторию заряженных частиц в нем (рисунок 2.24, [64]). В модели рассматривается идеальное дипольное поле, т.е. влияние краевых полей не учитывается и частицы не имеют углового разброса относительно средней плоскости.

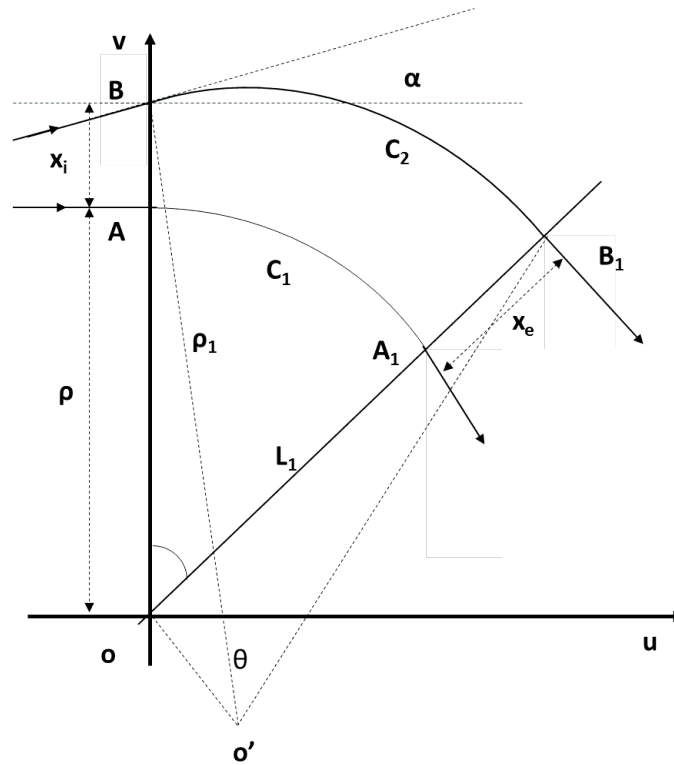


Рисунок 2.24 – Траектория частицы в магнитном поле

Центр окружности, в которой находится траектория движения эталонной частицы, является началом системы координат u и v . В то же время существует и система координат x, y, s , обычно используемая в теории ускорителей, начало которой следует за движением частицы. Ось v также является входным краем дипольного магнита. Частица вводится в A с магнитного края, а дуга AA_1 пред-

ставляет собой кривую траектории (C_1) на магнитной срединной плоскости, радиус кривизны равен ρ , угол изгиба равен θ , центр окружности - о. Другая частица, начальные координаты которой определяются смещением x_i и α (углом падения), имеет смещение импульса δ ($\delta = \Delta\rho/\rho$), точка входа находится в точке В магнита, а выход В₁. Дуга ВВ₁ - траектория частицы (C_2), центр окружности - о', радиус кривизны - ρ_1 , угол изгиба - θ_1 . Частицы на выходе приобретают смещение x_e относительно А₁ и угол α_e .

В системе координат о' (u_0, v_0) координаты частицы выражаются через начальные условия и радиус кривизны частицы:

$$u_c = \rho_1 \sin \alpha_i, \quad (2.2)$$

$$v_c = (x_i + \rho) - \rho_1 \cos \alpha_i. \quad (2.3)$$

Координаты частицы в точке В₁ могут быть выражены как:

$$u_1 = (x_e + \rho) \sin \theta, \quad (2.4)$$

$$v_1 = (x_e + \rho) \cos \theta. \quad (2.5)$$

Тогда x_e можно выразить как:

$$x_e = \frac{u_1}{\sin \theta} - \rho. \quad (2.6)$$

В системе координат (u, v) дуга C_2 имеет уравнение окружности:

$$(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2 = \rho_1^2. \quad (2.7)$$

Кромка выхода магнита L_1 , уравнение прямой линии:

$$v = u \cot \theta. \quad (2.8)$$

Можно получить одновременные уравнения дуги C_2 и ребра L_1 , точкой пересечения которых является В₁:

$$u_1 = \frac{u_c + v_c \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \pm \rho \frac{(1 + \delta)}{\sqrt{1 + \cot^2 \theta}} \sqrt{(1 + P)(1 - Q)}, \quad (2.9)$$

$$P = \frac{(u_c + v_c \cot \theta)^2}{1 + \cot^2 \theta} \frac{1}{\rho_1^2} \frac{1}{(1 - Q)}, \quad (2.10)$$

$$Q = \frac{u_c^2 v_c^2}{\rho_1^2}. \quad (2.11)$$

Подставив u_1 в формулу x_e , из которой можно получить координаты частицы положения B_1 .

Интегрируя координаты частицы B и точки B_1 , можно получить длину дуги S_2 , то есть путь частицы:

$$S = \rho_1 \left[\sin^{-1} \left(\frac{u_1 - u_c}{\rho_1} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{-u_c}{\rho_1} \right) \right]. \quad (2.12)$$

Магнитный спектрометр, используемый в линейном ускорителе СКИФ, оснащен тремя люминофорными экранами, установленными в направлении отклонения пучка на расстоянии 20 мм от средней плоскости. Экраны находятся на расстоянии в 100, 200, 350 мм от входной кромки дипольного магнита. На рисунках 2.25-2.27 показано смещение относительно центра экрана для различных отклонений энергии пучка от среднего значения.

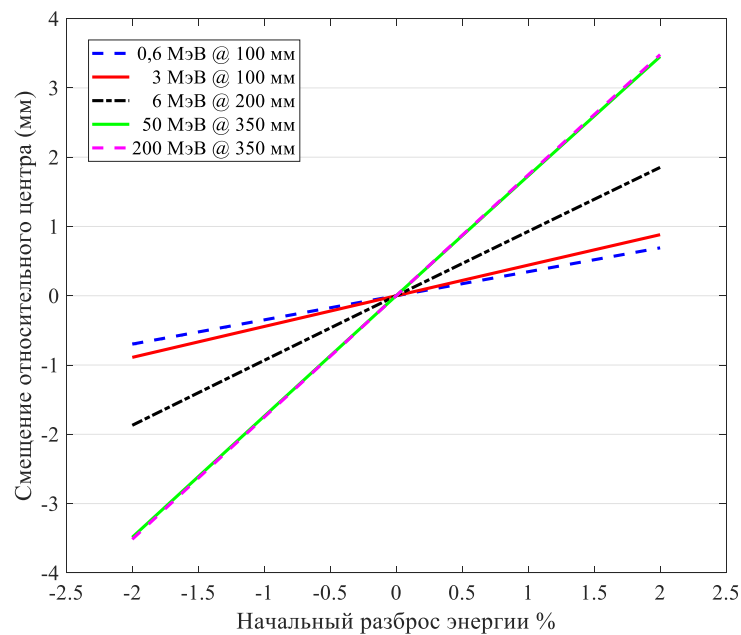


Рисунок 2.25 – Зависимость между сдвигом энергии относительно среднего значения и смещением частицы относительно центра экрана

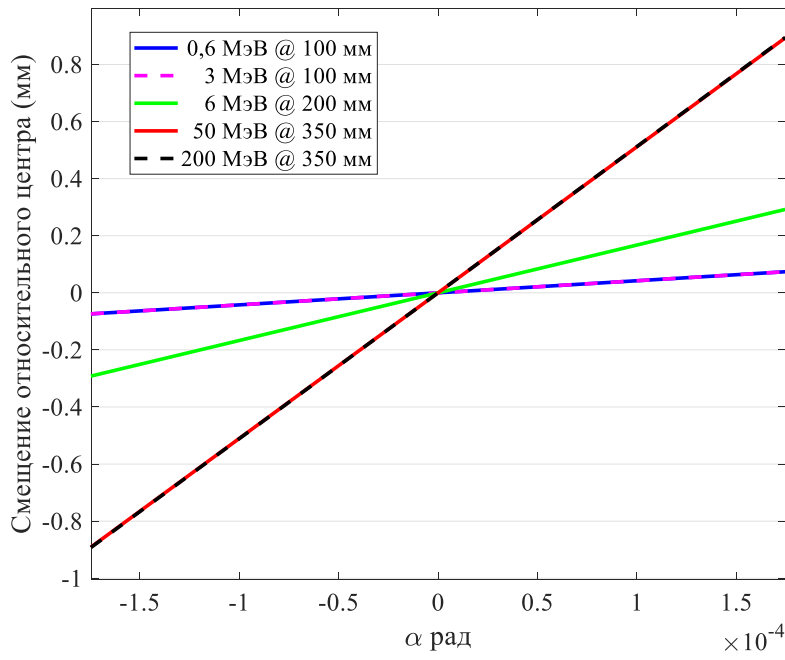


Рисунок 2.26 – Зависимость между углом частицы относительно оси и ее смещением на люминофорном экране

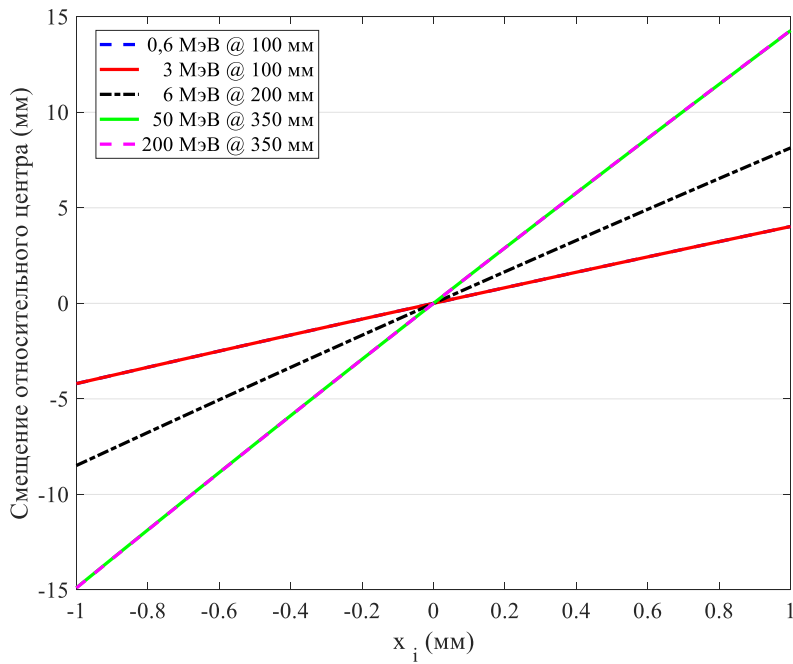


Рисунок 2.27 – Зависимость между начальным смещением x_i частицы и ее отклонением от центральной точки люминофорного экрана

2.3.3 Моделирование магнитного спектрометра

Для определения энергии и энергетического разброса пучка будет проводиться сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования. Для моделирования использовался код FLUKA Particle Transport Code, позволяющий рассчитывать движение частиц в магнитном поле и взаимодействие между частицами и веществом [65]. На рисунке 2.28 показан типичный результат моделирования.

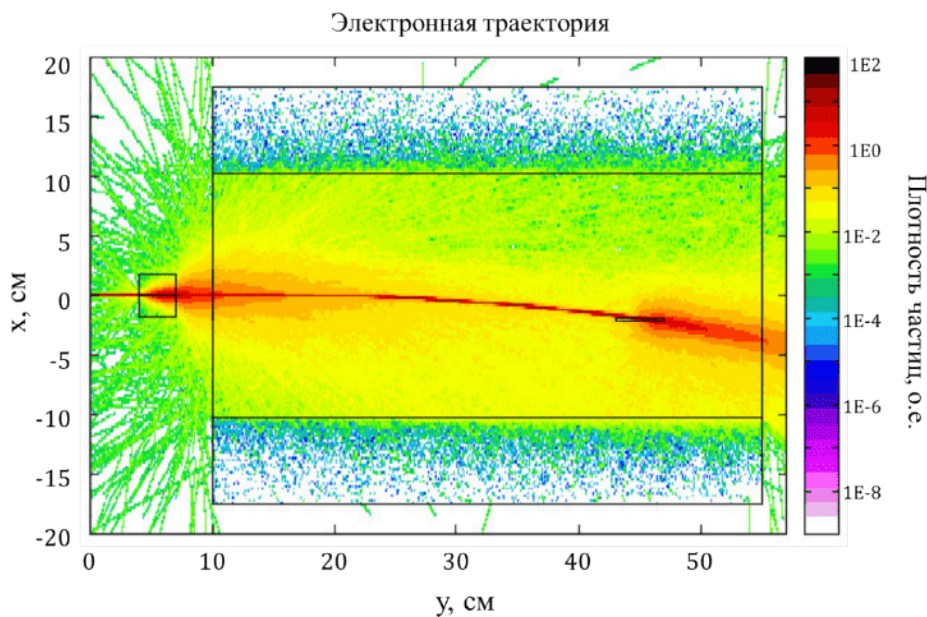


Рисунок 2.28 – Траектория пучка с энергией 47,4 МэВ в диполе

Для моделирования использовалась максимально реалистичная геометрия. Пучок частиц с расчетным размером, ожидаемом для данной энергии, пропусклся через коллиматор, и в дальнейшем рассматривалась динамика всех частиц, вышедших из коллиматора в магнитное поле диполя. При энергии пучка $E_b = 200$ МэВ через коллиматор проходило около 34% общего потока частиц, при $E_b = 50$ МэВ коллиматор пропускал около 12% от их потока. При этой энергии электронов необходимо учитывать возможность появления ореола вокруг изображения пучка на люминофоре из-за тормозного излучения, возникающего при взаимодействии пучка с коллиматором. Поток тормозных гамма-квантов также рассчитывался при помощи FLUKA. Выход рентгеновских гамма-квантов

при энергии $E_b = 0,6 - 6$ МэВ оказался пренебрежимо мал. На рисунке 2.29 показаны расчетные угловые распределения гамма-квантов, возбужденных электронным пучком с $E_b = 50$ МэВ. Количество гамма-квантов в щели составляет примерно 10% от общего количества падающих электронов, но малый угол расходимости излучения, около 1° , приводит к тому, что засветка гамма-квантами люминофорного экрана незначительна, что и подтвердилось на практике.

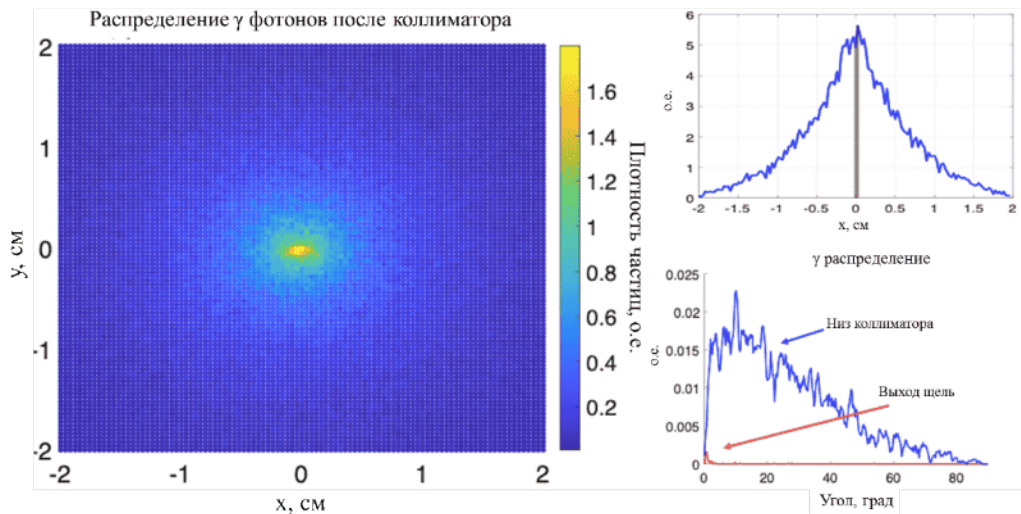


Рисунок 2.29 – Моделируемое угловое распределение гамма-фотонов. Гистограмма представляет собой область щели

В таблице 2.10 приведены расчетные значения магнитного поля, диапазон энергий и доступный измерениям энергетический интервал для различных экранов спектрометра. Согласно расчетам, спектрометр может измерять энергию пучка с точностью примерно 1% и энергетический разброс пучка с точностью около 5% для диапазона энергий 0,6 – 3 МэВ.

Энергию пучка с $E_b = 50, 200$ МэВ можно измерить с точностью около 1%, однако прецизионное измерение энергетического разброса затруднительно. Для его определения при $E_b = 200$ МэВ можно использовать поворотный магнит в канале линак – бустер, как это делается в [62]. Вместе с тем спектрометр можно использовать при $E_b = 200$ МэВ для определения энергии линака при его предварительной настройке.

Таблица 2.10 – Параметры расчета экрана магнитного спектрометра

L, мм	E, МэВ	E _{min} , МэВ	E _{max} , МэВ	B, Гс	E/dx, кэВ /мм
100	0,6	0,39	0,85	76,8	11,5
100	3	1,93	4,21	379,0	56,9
200	6	4,86	7,22	197,4	58,9
350	50	44,49	55,88	542,7	284,8
350	200	177,97	223,56	2171,0	1139,4

На рисунке 2.30 показано смоделированное изображение пучка, наблюдаемое на люминофорном экране для монохроматического пучка и пучка с разбросом по энергии.

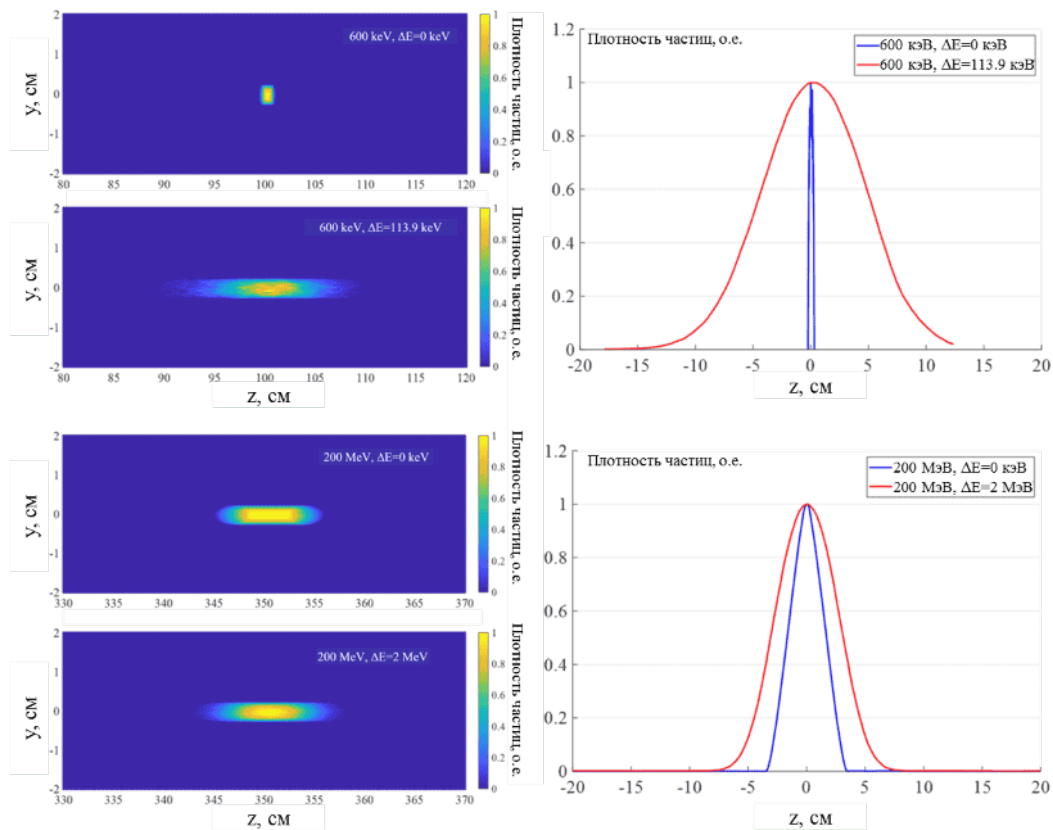


Рисунок 2.30 – Распределение плотности частиц, прошедших через щель коллиматора, на люминофорном экране. Сравниваются профили распределения для монохроматического пучка и пучка с проектным энергетическим разбросом

На рисунке 2.31 показан результат моделирования профиля пучка на люминофорном экране с $z = 350$ мм для пучков со средней энергией 47,82 МэВ и 47,32 МэВ (оба имеют одинаковый проектный энергетический разброс). Между изображениями имеется хорошо измеримое смещение $z = 1,9$ мм. Подложка на изображение возникает из-за электронов, рассеянных в коллиматоре.

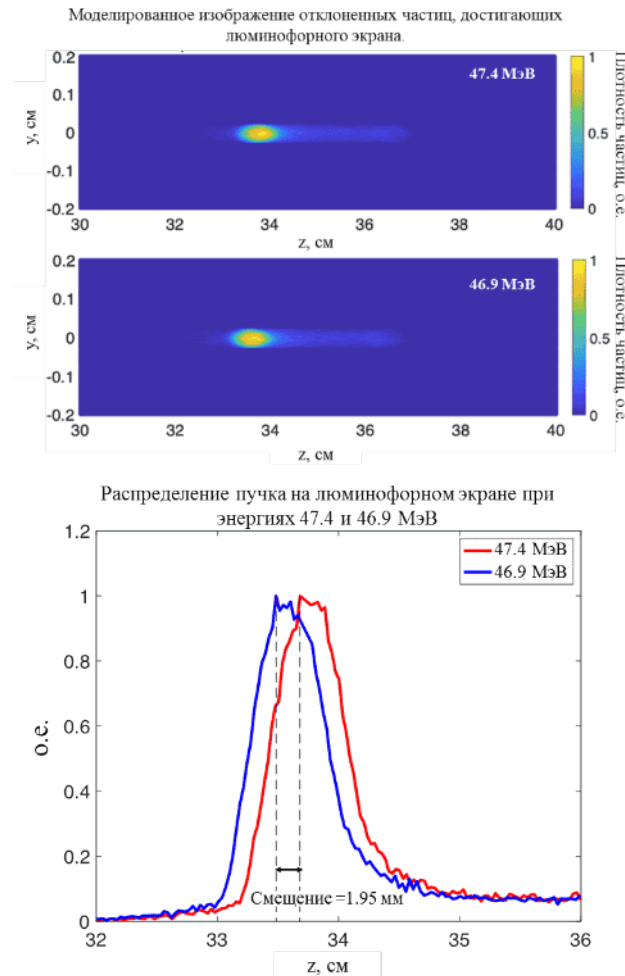


Рисунок 2.31 – Смоделированный продольный профиль пучка

Смоделированное распределение пучка при различных энергиях и расчетном разбросе энергии (таблица 2.10), отображаемое на соответствующем люминофорном экране, показано на рисунке 2.32.

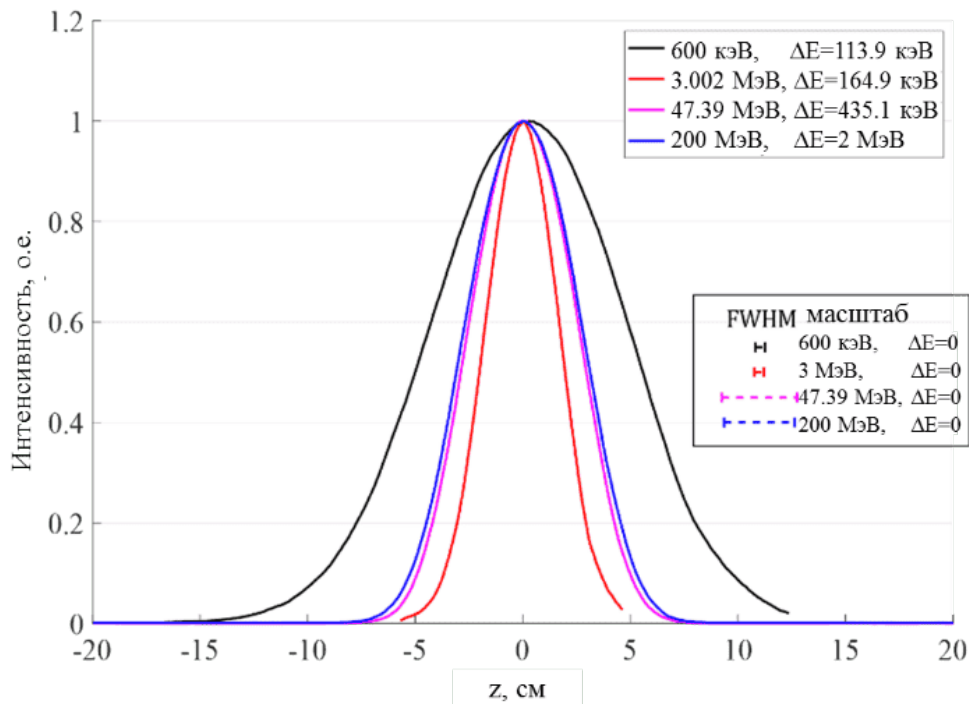


Рисунок 2.32 – Смоделированное распределение пучка на люминофорном экране при энергии, соответствующей разным каскадам линейного ускорителя

2.3.4 Измерение энергетического разброса пучка с энергией 200 МэВ

Предполагается использовать магнитный спектрометр, расположенный в конце полноразмерного линейного ускорителя для измерения энергии пучка 200 МэВ. Однако, как показывает моделирование FLUKA, на люминофорном экране магнитного спектрометра не удастся получить необходимое энергетическое разрешение. Поэтому предполагается использовать люминофорный экран и диполь в канале линейный ускоритель-бустер для измерения энергии и энергетического разброса пучка. Для проверки возможностей этого способа диагностики было выполнено численное моделирование динамики пучка на соответствующем участке канала. Положение диполей и люминофорного экрана в канале, которые будут использованы при измерениях энергии, показано на рисунке 2.33.

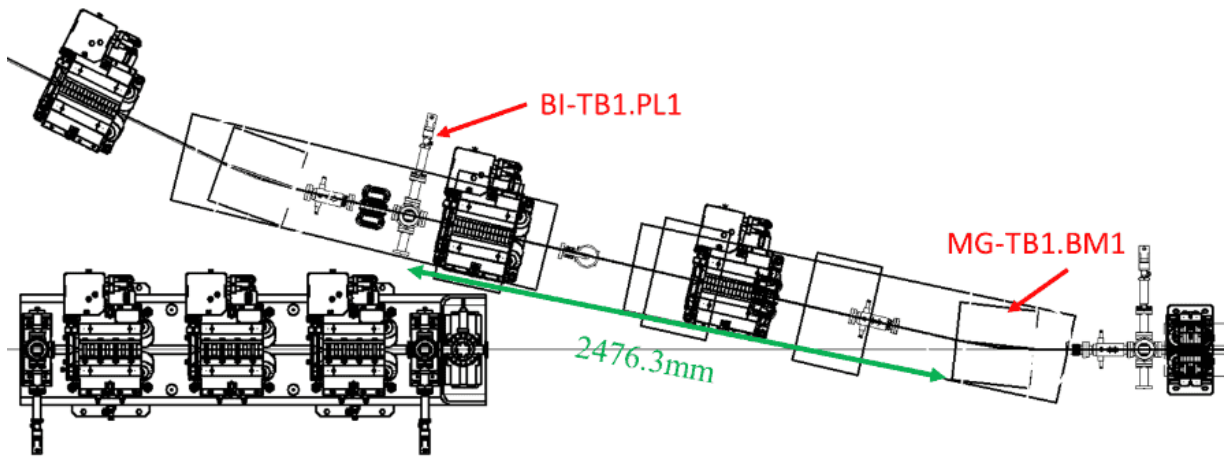


Рисунок 2.33 – Схема расположения люминофорного экрана (BI-TB1.PL1) и диполя (MG-TB1.BM1) в канале линейного ускорителя-бустера, которые будут использоваться для измерения энергии и энергетического разброса пучка линака при $E_b = 200$ МэВ

Распределение частиц до достижения пучком диполя показано на рисунке 2.34, поперечные размеры пучка $\sigma_x = 0,51$ мм, $\sigma_y = 0,58$ мм. Очевидно, что энергетическое распределение частиц не является классическим распределением Гаусса, и его стандартное отклонение (энергетический разброс σ_E) = 7,28 МэВ (см. рисунок 2.35). Распределение частиц в пучке получено по данным моделирования с помощью кода ELEGANT [66].

Рассчитанное с помощью FLUKA распределение частиц пучка с различной энергией, падающих на люминофорный экран при одном и том же магнитном поле, показано на рисунке 2.36. Из данных моделирования следует, что энергетическое разрешение диагностики будет не хуже 0,5% при $E_b = 200$ МэВ.

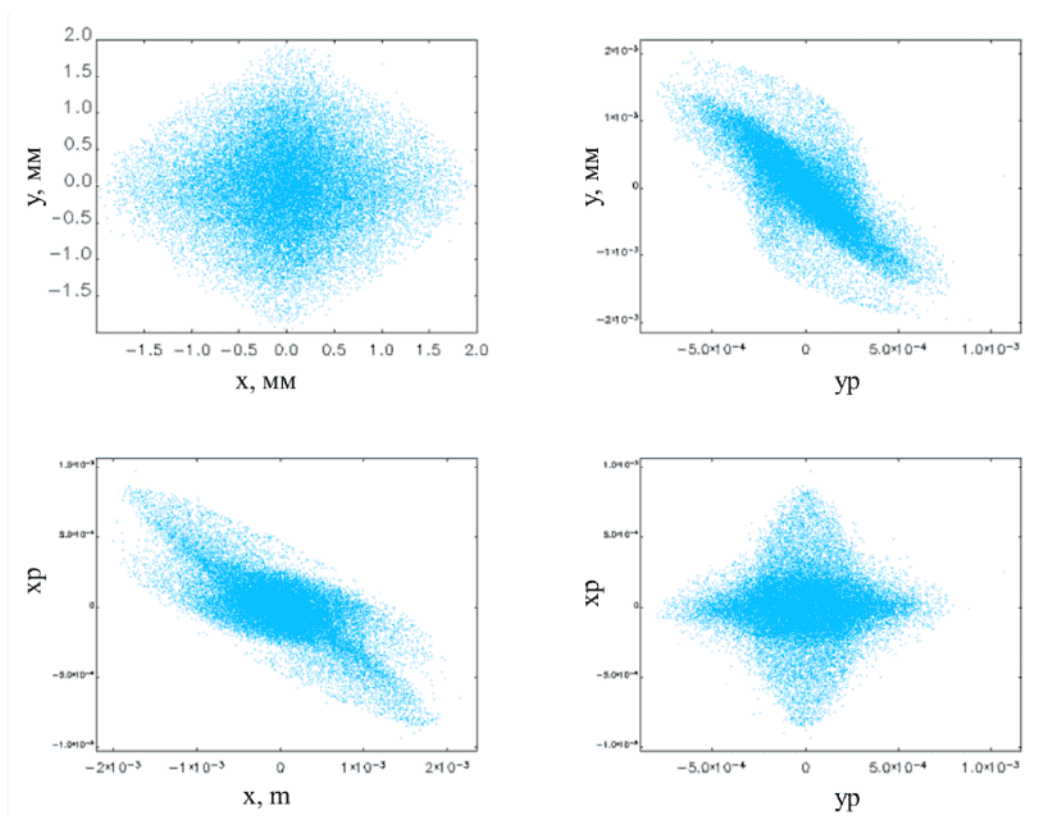


Рисунок 2.34 – Распределение пучка по координатам и импульсу перед входом в диполь MG-TB1.BM1 после линейного ускорителя

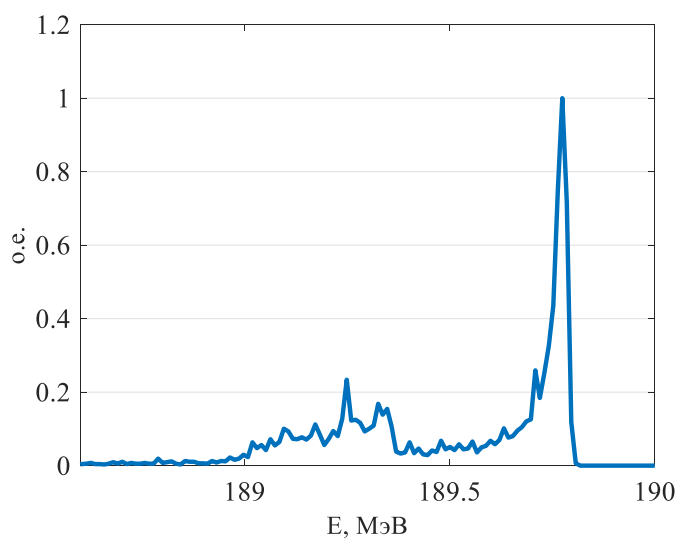


Рисунок 2.35 – Энергетический распределение частиц после линейного ускорителя перед входом в диполь MG-TB1.BM1, заданных при моделировании

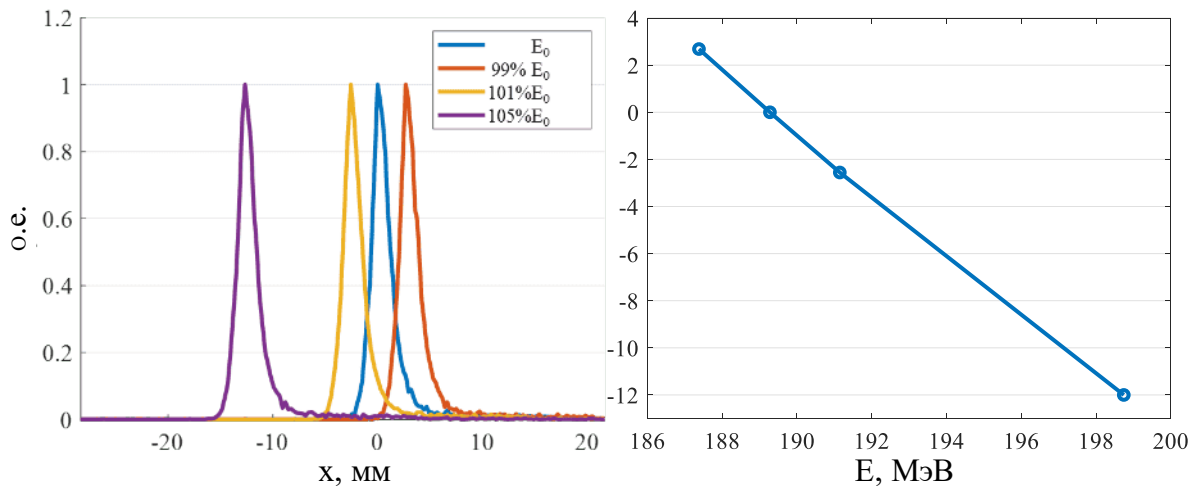


Рисунок 2.36 – Смещение изображения на люминофорном экране и соотношение между энергией пучка и максимумом интенсивности в изображении пучка для энергетических распределений

На рисунке 2.37 показано распределение энергии пучка перед входом в диполь, данные взяты из расчетов с помощью кода ELEGANT. Эти распределения имеют одинаковую среднюю энергию. Однако, поскольку распределение энергии не является гауссовым, dE на рисунке представляет собой стандартное отклонение энергетического распределения. На рисунке 2.37, справа, показано распределение частиц, отклоненных в диполе и падающих на люминофорный экран после пролета через дрейфовый участок длиной 2476 мм.

Зависимость между стандартным отклонением в энергетическом распределении пучка и стандартным отклонением распределения частиц на люминофорном экране показана на рисунке 2.38. Для пучка с энергией 200 МэВ и энергетической разбросом 1%, стандартное отклонение распределения на люминофорном экране составляет около 3 мм. Таким образом, точность измерения энергетического разброса пучка составляет около 5%.

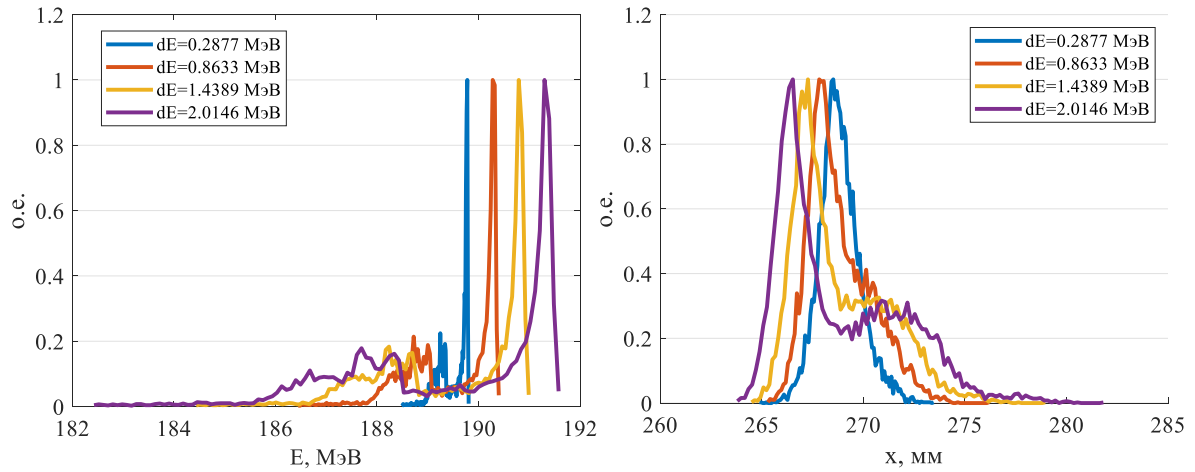


Рисунок 2.37 – Распределение частиц по энергии перед входом в диполь (слева).
Распределение положения частиц на люминофорном экране (справа)

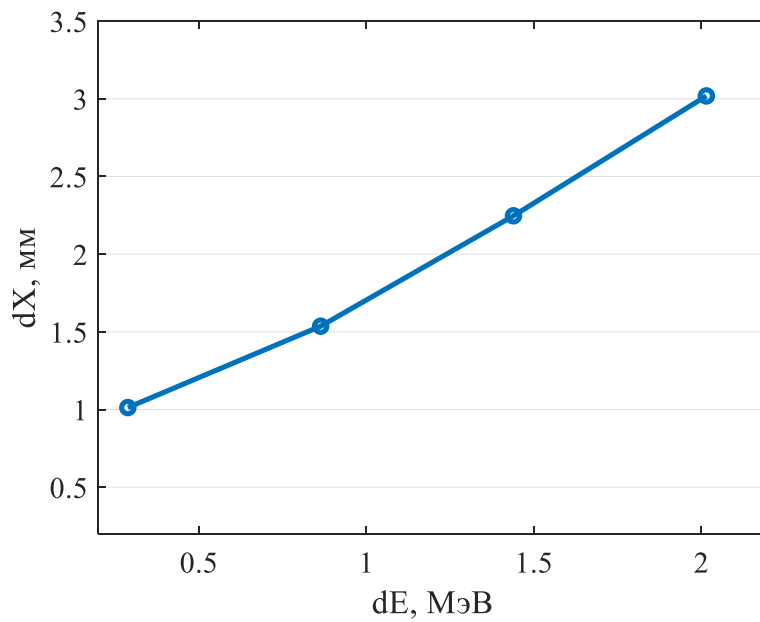


Рисунок 2.38 – Зависимость между стандартным отклонением энергии и стандартным отклонением распределения частиц на люминофорном экране для частиц с одинаковой средней энергией

2.4 Черенковский датчик

Черенковский детектор является важной частью диагностической системы линейного ускорителя на СКИФ и используется для измерения продольного размера пучка. Точное измерение продольного размера пучка тесно связано с отладкой линейного ускорителя и последующими повседневными операциями. Всего в структуре ускорителя будет установлено 4 черенковских датчика, их положение показано на рисунке 2.39. Они будут определять продольное распределение частиц в пучке при энергиях частиц в диапазоне от 0,6 до 50 МэВ.

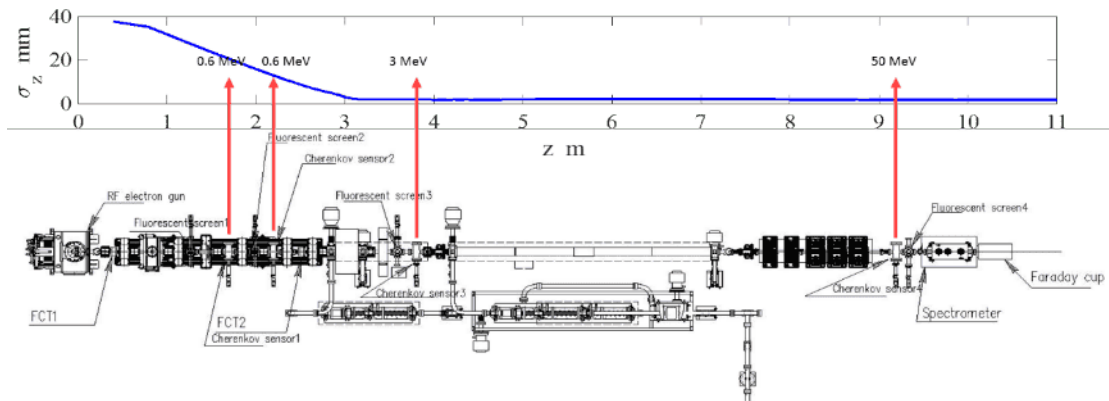


Рисунок 2.39 – Расположение черенковских датчиков в структуре линейного ускорителя

2.4.1 Принцип действия черенковского датчика

Заряженные частицы, движущиеся быстрее, чем скорость света в данной среде $v = c/n$, где n - показатель преломления среды, c - скорость света, испускают черенковское излучение [67]. Угол раскрытия образующегося черенковского излучения (рисунок 2.40) определяется как:

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta}, \quad (2.13)$$

где $\beta = v/c$. Угол θ зависит также от длины волны излучаемого света, поскольку существует дисперсия показателя преломления. Интенсивность излучения на

единицу пути определяется формулой Тамма-Франка [68]. Количество черенковских фотонов на длину пути частицы и на единицу длины волны равно:

$$\frac{d^2 N_{ph}}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha q^2}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right), \quad (2.14)$$

где α – постоянная тонкой структуры; q – заряд электрона; λ – длина волны черенковского излучения.

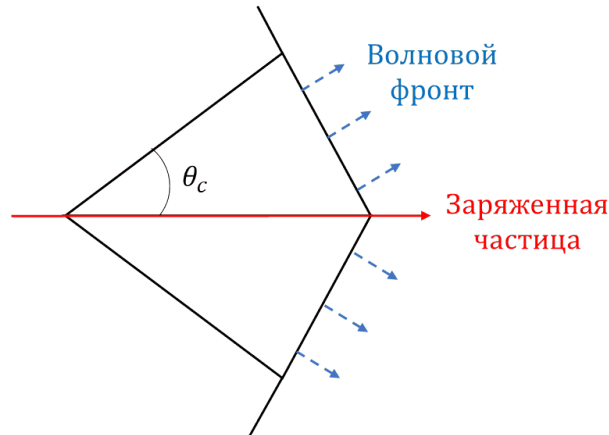


Рисунок 2.40 – Определение угла черенковского излучения

Число фотонов на электрон на единицу длины, генерируемых в оптическом диапазоне, от $\lambda_1 = 400$ нм до $\lambda_2 = 700$ нм), составляет:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{ph}}{dx} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \frac{d^2 N}{dx d\lambda} = 2\pi q^2 \alpha \sin^2 \theta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^2} = 2\pi q^2 \alpha \sin^2 \theta \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \\ &= 490 q^2 \alpha \sin^2 \theta. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Черенковский эффект практически безинерционен, его характерный временной масштаб составляет фемтосекунды. Однако черенковские датчики, используемые для измерения продольного распределения частиц в пучке, имеют вполне конечное временное разрешение.

Как показано на рисунке 2.41, предполагая, что два электрона e_1 и e_2 отделены в поперечном направлении друг от друга расстоянием d , а их продольные координаты в пучке одинаковы, то разница во времени (Δt) между черенковским излучением, испускаемом электронами, может быть выражена как [69]:

$$\Delta t = \frac{nd \sin \theta}{c} = \frac{d}{c} \sqrt{n^2 - \frac{1}{\beta^2}}. \quad (2.16)$$

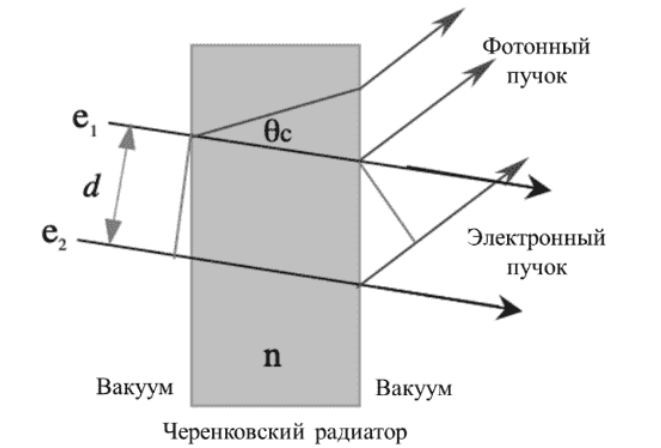


Рисунок 2.41 – Принципиальная схема распространения черенковских фотонов, генерируемых двумя электронами в среде с показателем преломления n

Следовательно, ограничение временного разрешения черенковского датчика зависит от поперечного размера пучка на входе излучателя и материала излучателя. Другие факторы, которые влияют на временное разрешение этого метода, незначительны в наших условиях. В таблице 2.11 показаны ожидаемые параметры датчиков в зависимости от вещества черенковского радиатора при $E = 50$ МэВ.

Таблица 2.11 – Соответствующие датчики временного разрешения, размера пучка и коэффициента преломления вещества радиатора

Размер пучка, мм	Коэффициент преломления вещества радиатора	Временное разрешение, пс
1	1,46 (кварц)	3
3	1,46	9
5	1,46	15
7	1,46	21
1	1,05 (аэрогель)	1
3	1,05	3
5	1,05	5
7	1,05	7

Разным энергиям пучка соответствуют разные черенковские углы излучения, поэтому в зависимости от энергии, меняется угол конусов, используемых для коллимации излучения. На рисунке 2.42 показана расчетная модель, а соответствующая зависимость между энергией и углом показана в Таблица 2.12.

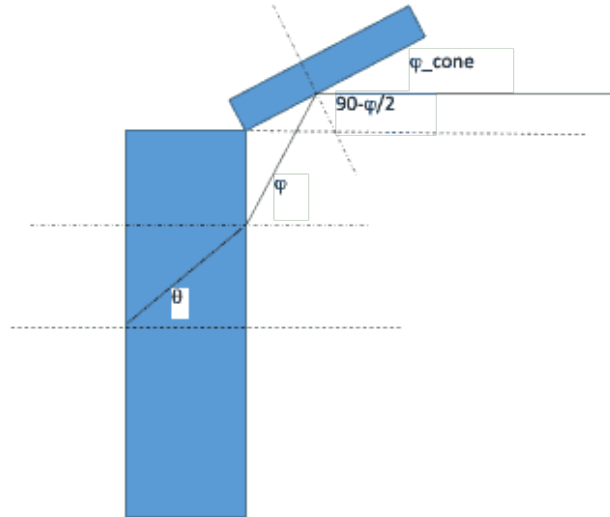


Рисунок 2.42 – Геометрия расчета угла конуса Черенкова

Таблица 2.12 – Соответствие между энергией пучка и углом черенковского конуса

Энергия	Коэффициент преломления вещества радиатора	θ	φ	φ_{cone}
0,6 МэВ	1,46	39,52°	68,3°	34,15 ± 9°
3 МэВ	1,05	15,71°	16,5°	8,26 ± 3°
6 МэВ	1,05	17,19°	18,08°	9,04 ± 3°
50 МэВ	1,05	17,74°	18,66°	9,33 ± 3°

2.4.2 Моделирование черенковского датчика

Теоретически, электронный пучок с энергией 0,6 МэВ не может генерировать черенковский свет в аэрогеле (показатель преломления $n = 1,05$). Следовательно, только кварц ($n = 1,46$) мог быть использован в качестве излучателя при низкоэнергетическом пучке. С другой стороны, черенковское излучение, вызы-

ваемое в кварце электронами с энергиями 3, 50, 200 МэВ не покидает плоскую пластину из-за эффекта полного внутреннего отражения, поэтому в качестве радиатора нужно использовать аэрогель. Электроны с энергией 0,6 МэВ испытывают в кварце сильное рассеяние и поглощение, и расчет показывает, что толщину кварцевой пластины необходимо ограничить до миллиметрового уровня. Поскольку количество черенковских фотонов пропорционально толщине пластины, то ее оптимальная толщина определялась с помощью численного моделирования.

Моделирование излучения черенковских фотонов было проделано с помощью кода FLUKA. Угловое распределение черенковского излучения, возбуждаемого пучком с энергией 0,6 МэВ в кварцевой пластине разной толщины показано на рисунке 2.43. Оптимальная толщина кварцевой пластины не превышает 0,4 – 0,5 мм. Фотоны излучаются в большой телесный угол, что связано с угловым и энергетическим разбросом электронов, увеличивающимся при прохождении через кварцевую пластину. С учетом реалистичного телесного угла оптической системы, можно ожидать, что только 5% общего потока фотонов достигнет фотокатода стрик-камеры (см. раздел “Стрик-камера”), что составляет около 2×10^9 частиц. Этого вполне достаточно для надежного определения длительности черенковской вспышки с временным разрешением около 3 пс.

Аэрогель может использоваться в качестве излучателя для измерения пучка с энергией 3 МэВ, 50 МэВ и 200 МэВ. По данным, полученным из моделирования с помощью FLUKA, полный поток фотонов, генерируемый аэрогелем толщиной 5 мм, равен $N_{ph} \approx 1,5 \times 10^{11}$ для заряда пучка 1 нК. Угловое распределение фотонов на выходе из аэрогеля показано на рисунке 2.44.

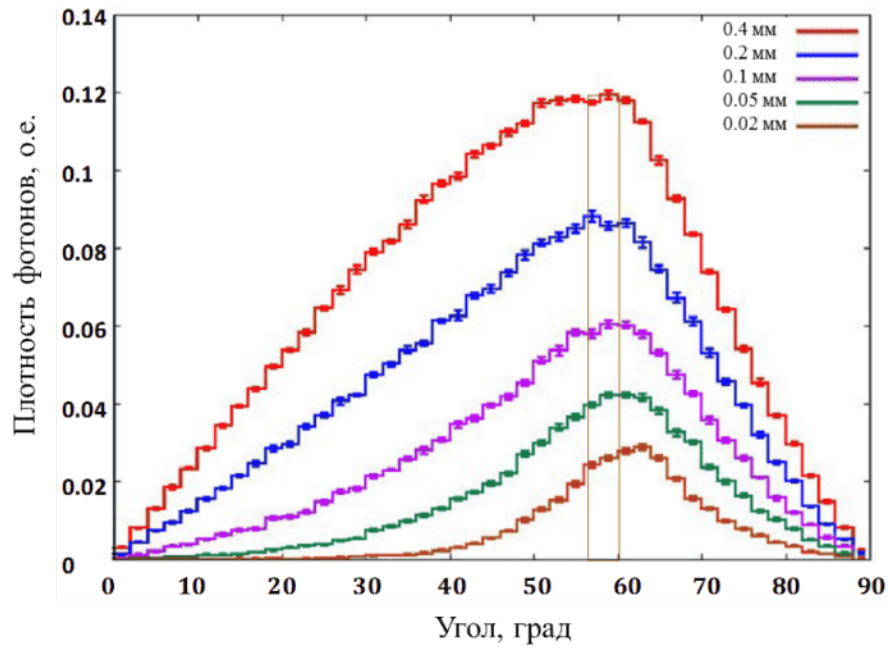


Рисунок 2.43 – Угловое распределение черенковского излучения пучка электронов с энергией 0,6 МэВ через кварцевую пластину разной толщины. Выделен диапазон по углу в 3,5 градуса

Угловое распределение фотонов Черенкова, аэрогель (5 мм)

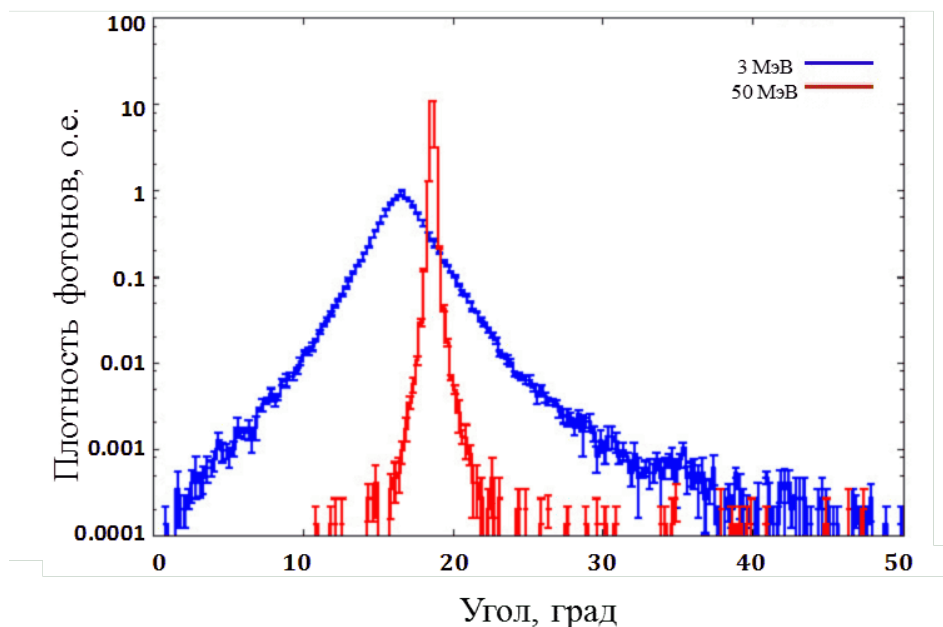


Рисунок 2.44 – Угловые распределения черенковских фотонов, испускаемых электронным пучком с энергией 3 МэВ и 50 МэВ, проходящим через 5 мм аэрогель

Очевидно, что угол расходимости черенковского излучения сильно уменьшен по сравнению с энергией 0,6 МэВ. Принимая угловое распределение 3 МэВ в качестве примера, около 90% всех испускаемых фотонов заключено в диапазоне $\pm 1,5^\circ$ относительно пика распределения на 18° . Это позволяет остро сфокусировать черенковский свет на фотокатод стрик-камеры, т.е. временное разрешение датчика будет ограничено временным разрешением этого прибора.

2.4.3 Конструкция черенковского датчика

Конструкция датчика представлена на рисунках 2.45-2.46. Оптическая схема датчика одинакова для всех трех энергий пучка, и отличается лишь веществом черенковского радиатора и углом коллимирующего конуса (Таблица 2.13). Черенковский свет должен быть сфокусирован на фотокатод стрик-камеры, которая и измерит длительность вспышки света.

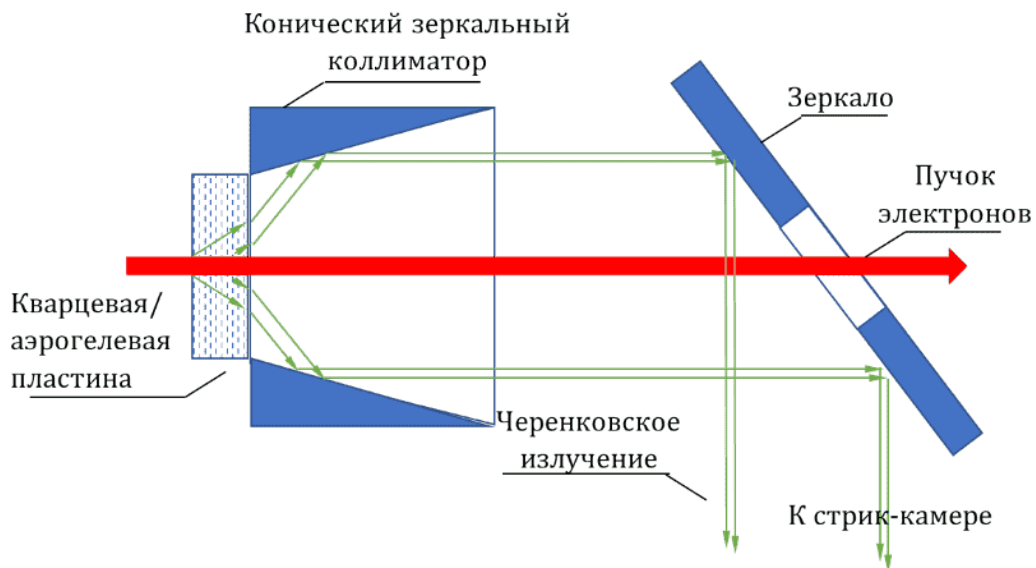


Рисунок 2.45 – Схема черенковского датчика для измерения продольного профиля пучка

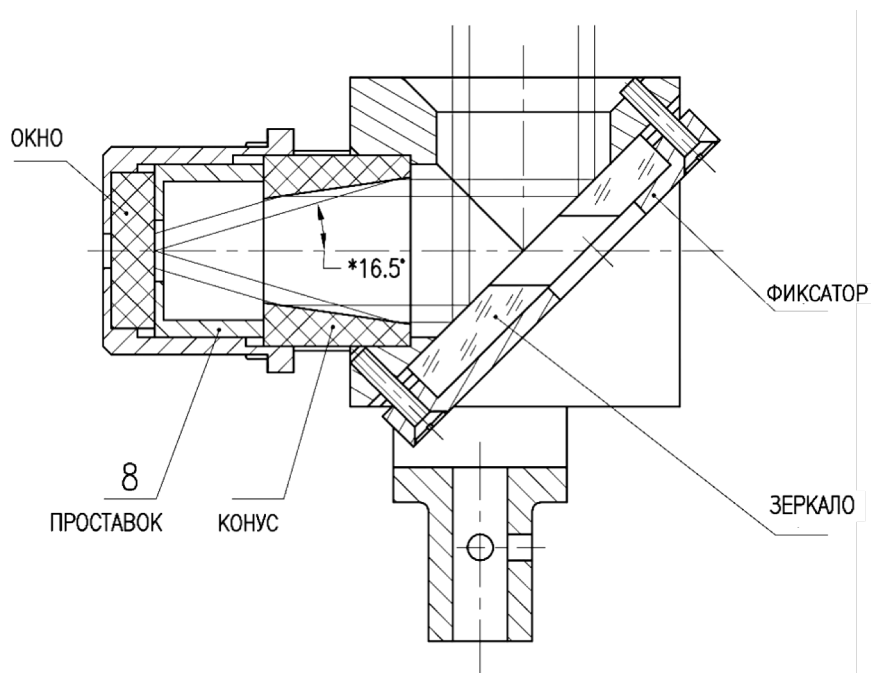


Рисунок 2.46 – Схема конуса черенковского датчика на примере случая $E_b = 3$ МэВ

Таблица 2.13 – Толщина и угол конусного радиатора, соответствующие каждой энергии

Энергия	Радиатор	Толщина радиатора	Угол конуса
0,6 МэВ	кварц	0,4 мм	$68,3 \pm 9^\circ$
3 МэВ	аэрогель	5 мм	$16,5 \pm 3^\circ$
6 МэВ	аэрогель	5 мм	$18,07 \pm 3^\circ$
50 МэВ	аэрогель	5 мм	$18,6 \pm 3^\circ$

Полная механическая структура датчика показана на рисунке 2.47. Черенковский датчик вводится на ось камеры ускорителя при помощи высоковакуумного актуатора с шаговым двигателем САНВ-10, однотипного с используемыми в других устройствах.

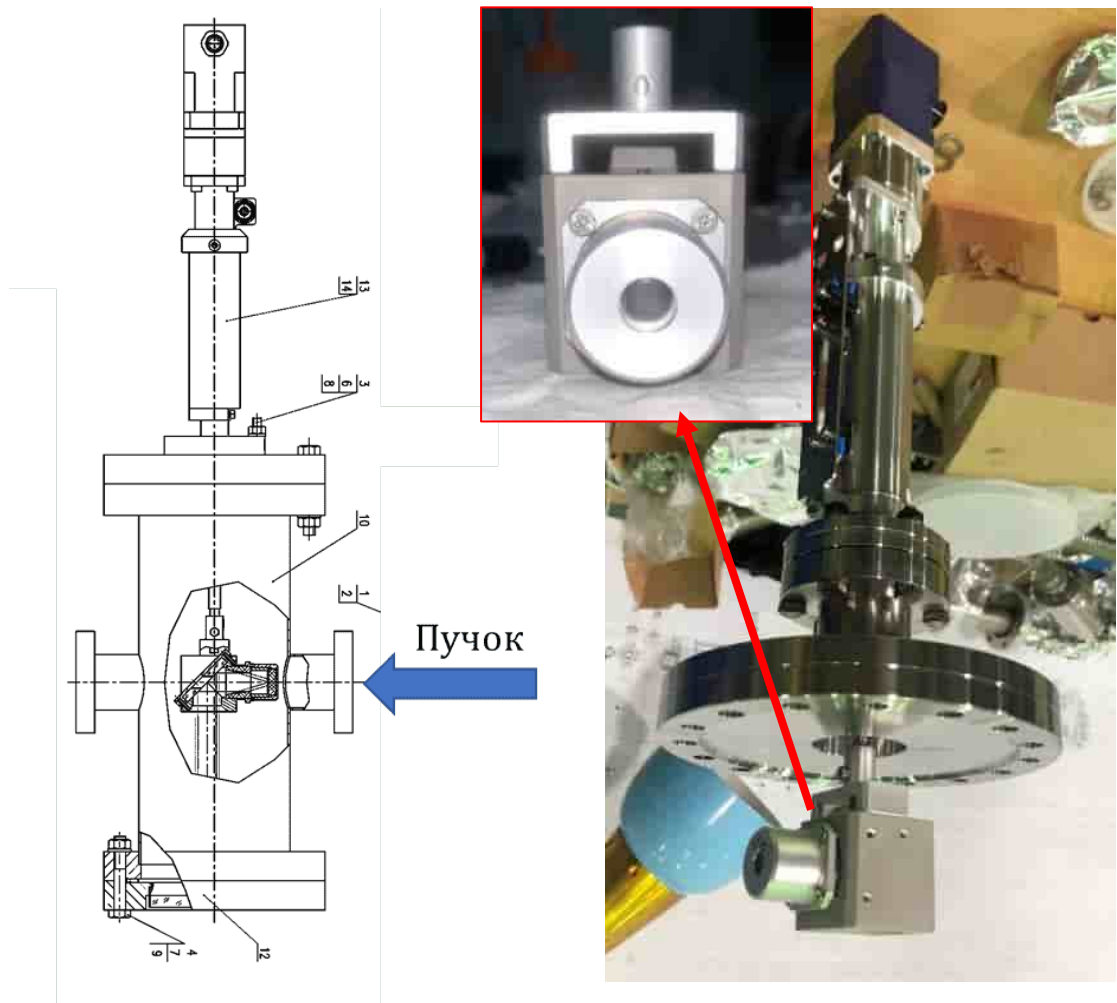


Рисунок 2.47 – Устройство черенковского датчика

Стрик-камера

Стрик-камера использовалась для измерения длительности вспышки черенковского излучения. Это прибор для регистрации быстропротекающих процессов, сопровождающихся оптическим излучением.

Принцип действия стрик-камеры основан на преобразовании времени в координату и проиллюстрирован на рисунке 2.48. Световой импульс выглядит на выходном экране камеры как узкая короткая полоска, длина которой пропорциональна длительности импульса.

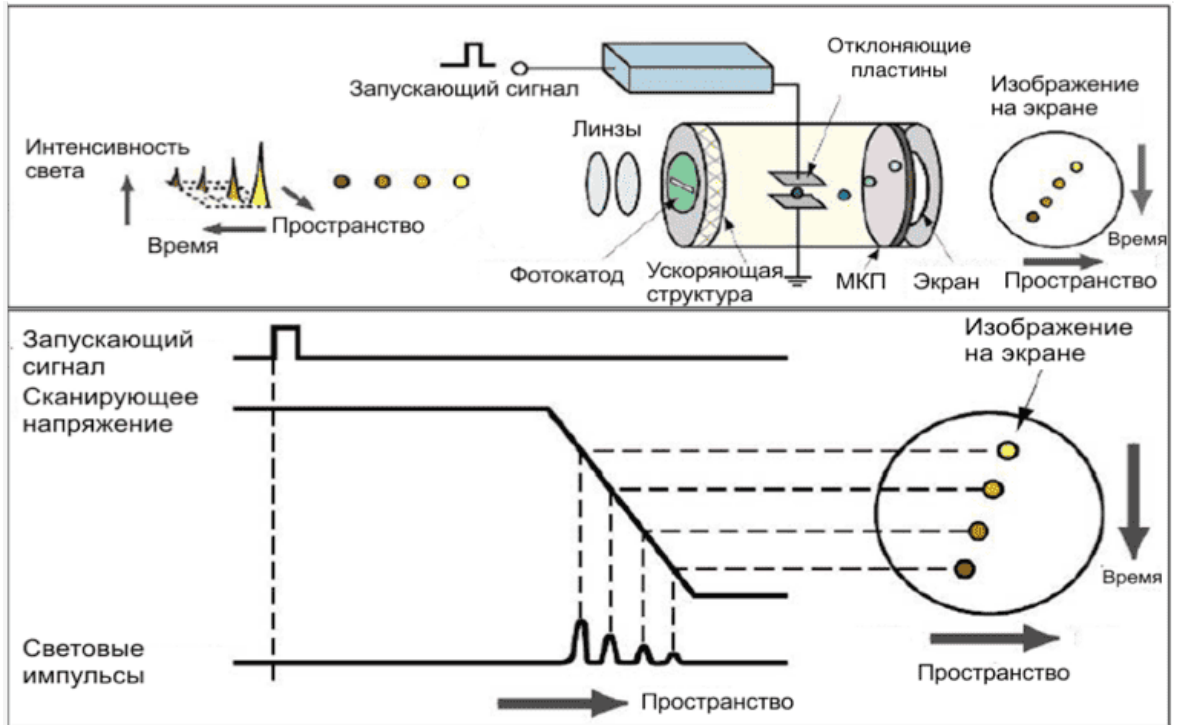


Рисунок 2.48 – Схематическое устройство стрик-камеры

Для регистрации фотонов черенковского света мы применяли стрик-камеру PS-1/S20 [70]. Ее параметры и внешний вид приведены на рисунке 2.49, таблице 2.14.



Рисунок 2.49 – Внешний вид стрик-камеры PS-1/S20

Таблица 2.14 – Параметры стрик-камеры PS-1/S20

Тип время-анализирующего ЭОП	ПИФ-01
Три диапазона длительностей развертки (нс/экран)	0,25; 0,75; 1,5 (диаметр выходного экрана ЭОП 25 мм)
Соответствующие скорости развертки (пс/мм)	10, 30, 60
Максимальный коэффициент усиления по яркости МКП	3×10^4
Временная нелинейность разверток $[(V_{\max} - V_{\min})/V_{\text{ср}}]$	не более 5%
Длительности развертки на экран 25 мм (нс)	0,21; 0,765; 1,5; 3; 10; 30; 100
Длительность лазерных импульсов (FWHM)	(5 – 25) пс
Временное разрешение для ЭОП с фотокатодом S20 (пс)	не хуже 1
Динамический диапазон регистрации (при максимальном временном разрешении)	не менее 10
Временная нелинейность разверток (%)	не более 10
Задержка срабатывания (нс)	не более 20
Нестабильности срабатывания (пс)	не более ± 3

Максимальная скорость развертки стрик-камеры равна 10 пс/мм, т.е. для получения пикосекундного временного разрешения требуется сфокусировать пучок на фотокатод в размер 0,2 мм.

2.5 Цилиндр Фарадея

Цилиндры Фарадея широко используются для измерения зарядов пучков заряженных частиц. При этом существуют определенные требования к их конструкции:

- Материал ЦФ должен быть не активирующимся, немагнитным, иметь приемлимые вакуумные свойства (при необходимости).
- ЦФ должен полностью остановить ток измеряемого пучка, а также вторичные заряженные частицы, возникающие при взаимодействии между измеряемым пучком и ЦФ. Это означает, что общая потеря заряда должна быть менее 5%.
- ЦФ должен иметь по возможности компактные размеры и небольшую электрическую емкость.

По сути, цилиндр Фарадея — это просто экранированный изолированный проводник, достаточно толстый, чтобы остановить падающие заряженные частицы. Заряд, накопленный в ЦФ, пропорционален количеству электронов, поглощенных в нем.

На рисунке 2.50 показана схема измерения заряда с помощью цилиндра Фарадея [71].

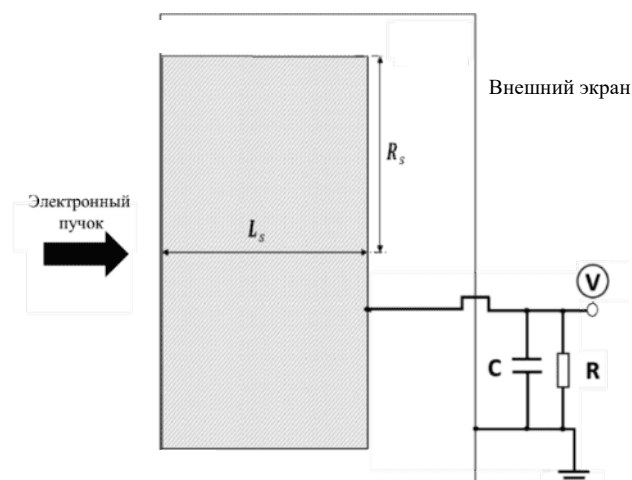


Рисунок 2.50 – Схема подключения цилиндра Фарадея

Ток I (А) определяется путем измерения потенциала цилиндра и вычисления по следующей формуле:

$$I = C \frac{dU_c}{dt} = \frac{U_0 - U_c}{R}, \quad (2.17)$$

$$U_c = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (2.18)$$

где C — общая емкость (Ф), U_c — напряжение (В), постоянная времени $\tau = RC$, R — Сопротивление (Ом). Емкость является постоянным параметром, и при изменении заряда цилиндра соответственно изменяется и напряжение на конденсаторе.

2.5.1 Моделирование поглощения частиц в цилиндре Фарадея

Были разработаны два разных цилиндра Фарадея для пучка с энергиями ниже и выше 3 МэВ. Код FLUKA использовался для моделирования потери частиц в цилиндре Фарадея для разных материалов и размеров.

На рисунке 2.51 показан процент поглощения пучка в ЦФ в зависимости от его длины при энергии пучка линака $E_b = 200$ МэВ. Характеристики ЦФ из меди и свинца при низкой энергии пучка $E_b = 0,6 - 3$ МэВ не сильно различаются: при толщине 2 см около 5% заряда пучка уходит с выходной поверхности поглотителя с вторичными электронами; при радиусе ЦФ 2 см потери частиц на боковых сторонах поглотителя не превышают 1%.

Однако, моделирование при высоких энергиях 200 МэВ (рисунок 2.52) показывает значительные различия между материалами, из которых ЦФ может быть изготовлен, при этом свинец демонстрирует наилучшие характеристики. При толщине ЦФ 7 см и радиусе 6 см процент выхода вторичных электронов может достигать 5% для меди и 1% для свинца. Принимая во внимание размер ЦФ и противорадиационные характеристики, свинец является лучшим выбором для ЦФ при высокой энергии пучка. Емкость ЦФ составляет порядка десятков пикофарад.

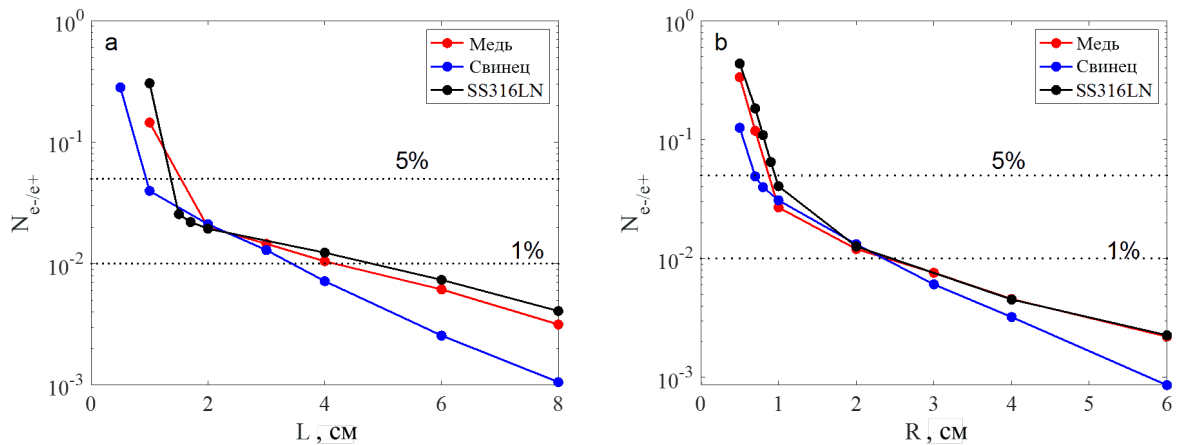


Рисунок 2.51 – Моделирование при $E_b = 200$ МэВ (а) соотношения первичных и вторичных электронов, вылетающих на выходе из цилиндра Фарадея, в зависимости от толщины цилиндра L и (б) количества первичных и вторичных электронов, вылетающих с поверхности цилиндра Фарадея, в зависимости от R

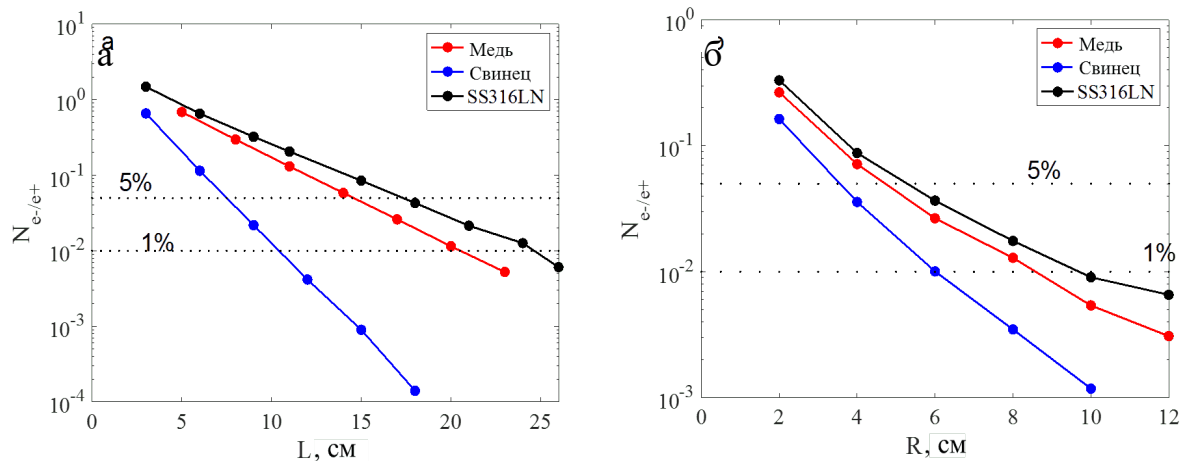


Рисунок 2.52 – Моделирование при $E_b = 200$ МэВ (а) соотношения первичных и вторичных электронов, вылетающих на выходе из цилиндра Фарадея, в зависимости от толщины L и (б) количества первичных и вторичных электронов, вылетающих с поверхности цилиндра Фарадея, в зависимости от R

2.5.2 Моделирование радиационной защиты

Помимо задачи измерения тока пучка, цилиндр Фарадея играет также роль поглотителя пучка. Предполагается, что после отладки ускорителя ЦФ будет установлен на выходе дипольного спектрометра и на него при настройке линака будет сбрасываться пучок с $E_b = 200$ МэВ. Для построения карты радиационного поля, возникающего при взаимодействии пучка с $E_b = 200$ МэВ с коллиматором на входе спектрометра, люминофорным экраном и ЦФ было проведено моделирование с помощью кода FLUKA (рисунок 2.53).

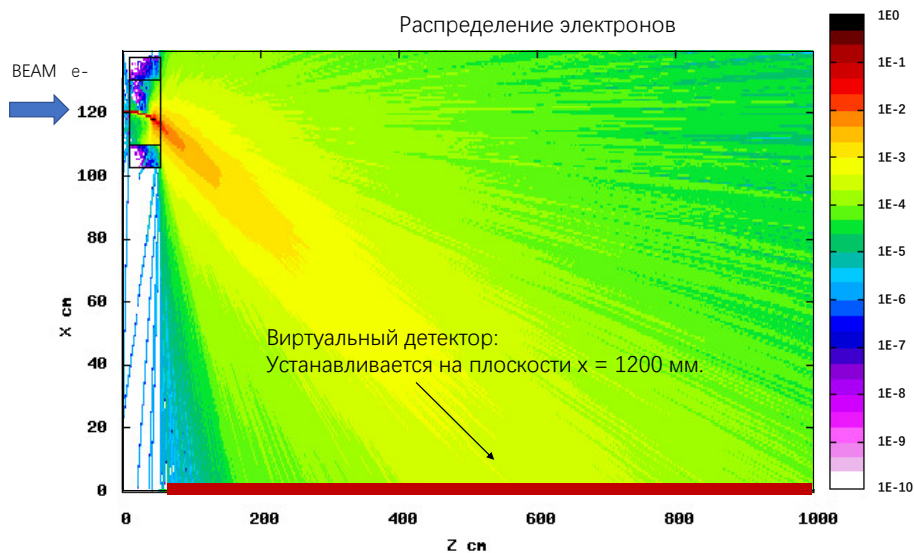


Рисунок 2.53 – Вторичный электронный ливень при энергии 200 МэВ

С учетом конструкции устройства радиационной защиты магнитного спектрометра моделировался вторичный ливень после попадания на люминофор луча с энергией 200 МэВ. В имитационной модели пучок с энергией 200 МэВ отклоняется в магнитном поле и достигает люминофорного экрана на расстоянии 350 мм от входа диполя. При моделировании учитываются медная катушка магнита и железное ярмо.

На рисунках 2.54-2.55 показан расчетный ливень вторичных электронов и их распределение на условной поверхности, на которой спектрометр установлен. Ось магнитного спектрометра находится на высоте 1200 мм выше этой поверх-

ности. Максимум распределения расположен на расстоянии 4800 мм от магнитного спектрометра, а полуширина распределения составляет около 4000 мм (рисунок 2.54).

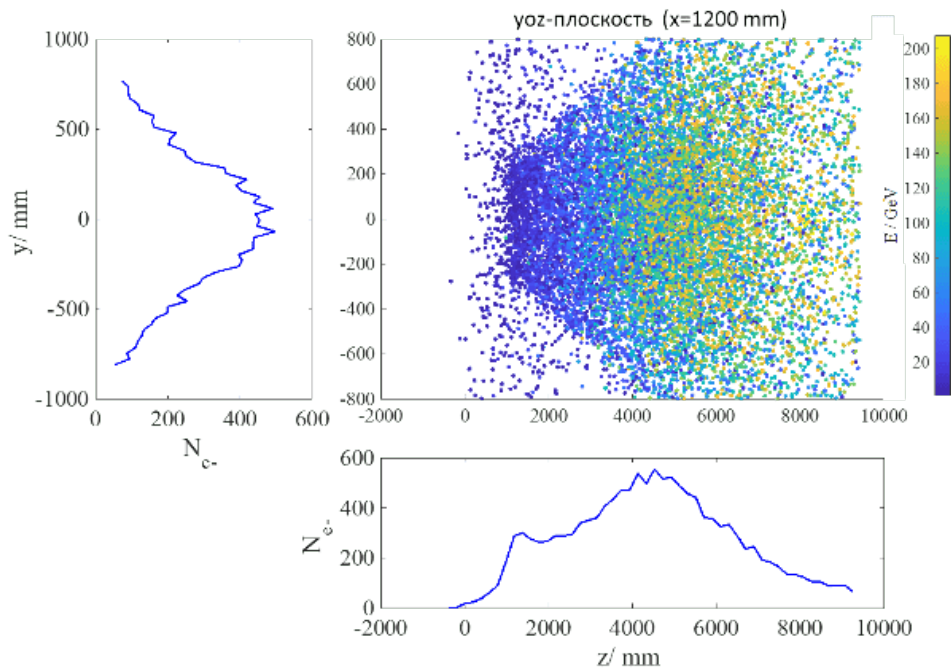


Рисунок 2.54 – Распределение электронов на поверхности, расположенной на 1200 мм ниже оси спектрометра

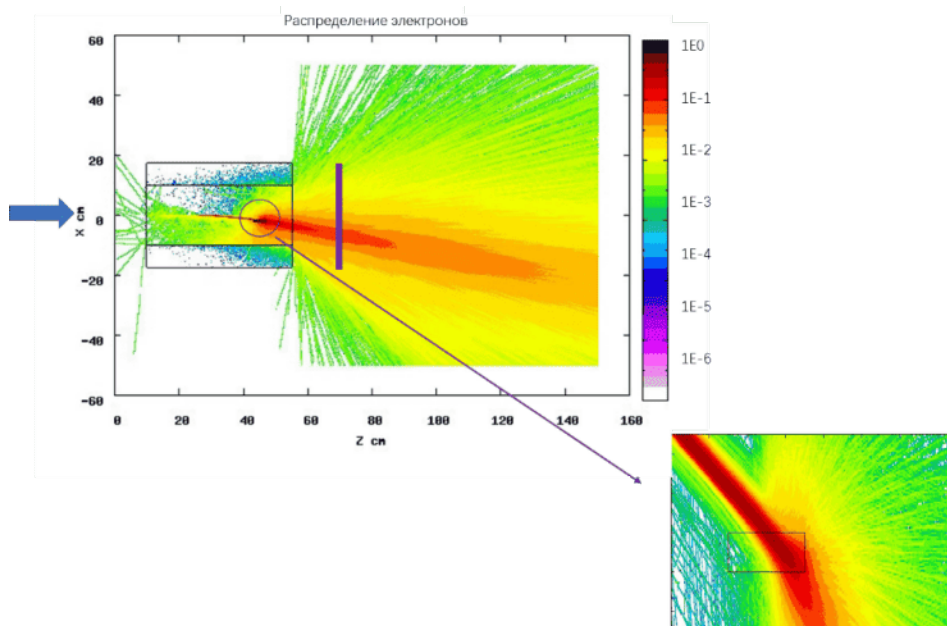


Рисунок 2.55 – Вторичный электронный ливень и детали после диполя

Для проектирования радиационной защиты требуется информация о распределении электронов за магнитным спектрометром. Рисунок 2.55 представляет собой распределение вторичного электронного ливня распределения электронов на разных расстояниях после моделирования магнитного спектрометра. Как видно из рисунка 2.56, на расстоянии 1 см от выхода диполя плотность частиц очень велика, а пик более острый. Когда расстояние от выхода составляет 48 см, кривая плавная, а пиковое значение уменьшается примерно в 5 раз.

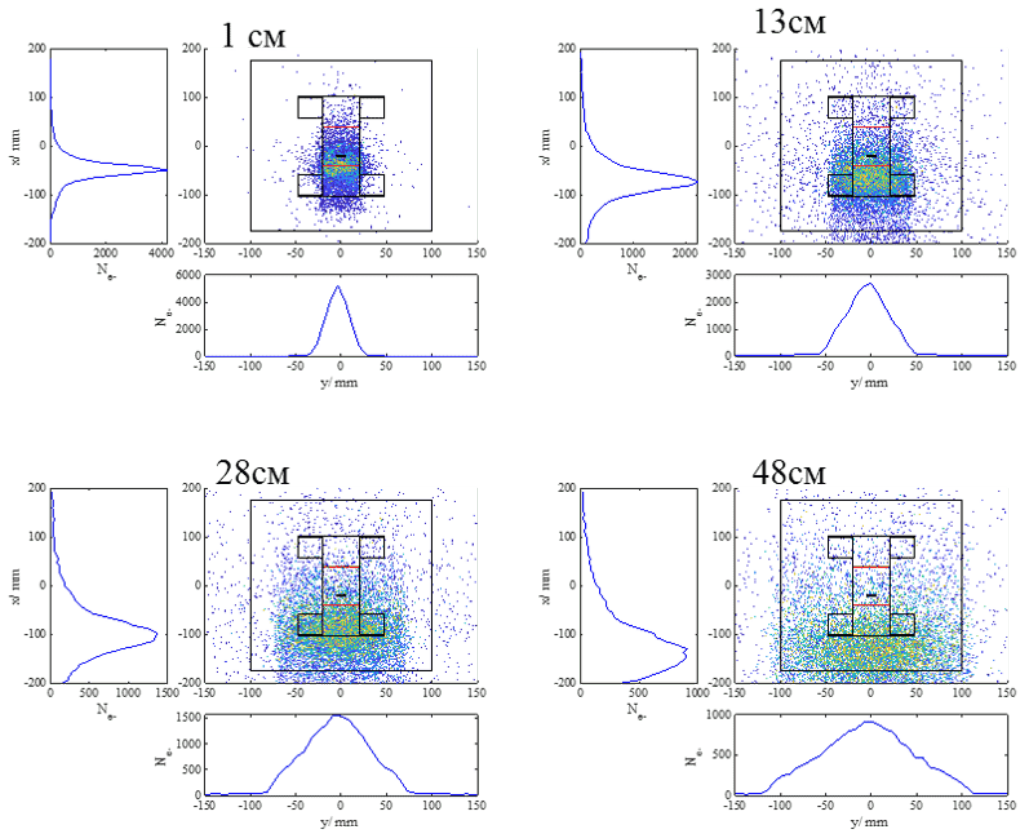


Рисунок 2.56 – Распределение частиц после диполя. Сверху вниз и слева направо распределение 1 см, 13 см, 28 см, 48 см от выхода диполя

Угол между направлением на максимум в распределении ливня и осью пучка около 10 градусов (рисунок 2.57).

Эти расчеты были переданы коллегам-инженерам, отвечающим за радиационную безопасность в ИЯФ СО РАН и учтены при конструировании радиационной защиты спектрометра. Внешний вид собранной радиационной защиты для ЦФ, работавшем на стенде линейного ускорителя, показан на рисунке 2.58.

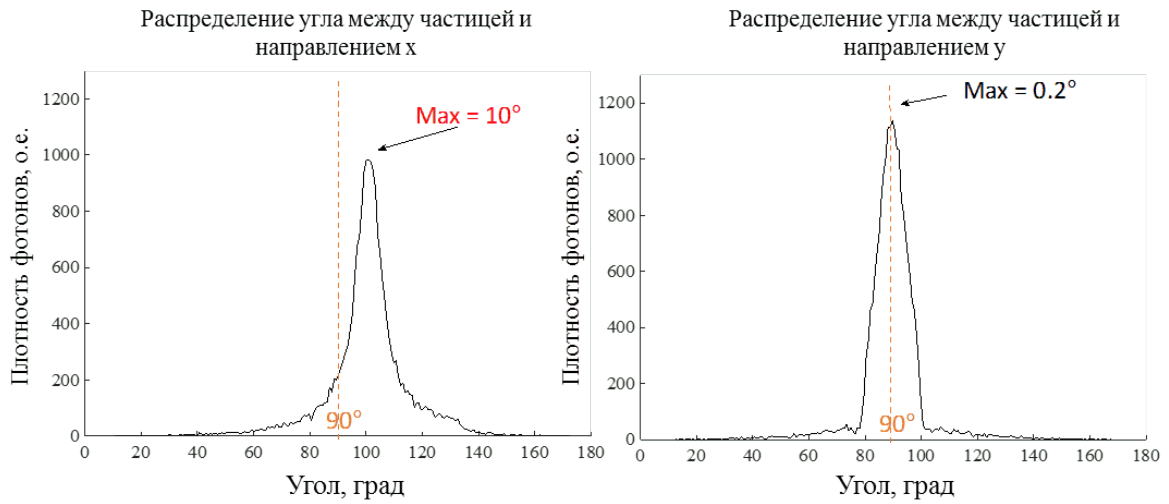


Рисунок 2.57 – Угол между направлением в распределении ливня и осью пучка

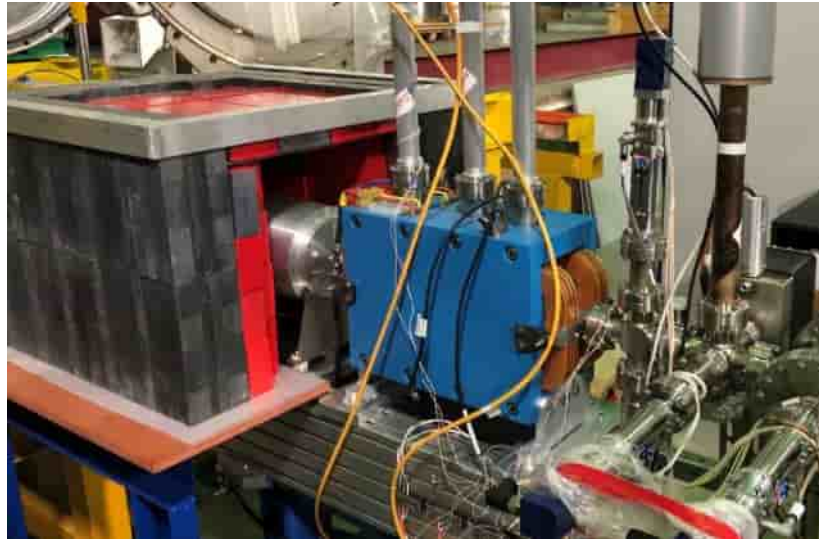


Рисунок 2.58 – Фотография радиационной защиты цилиндра Фарадея, установленной на стенде линейного ускорителя

ГЛАВА 3. Настройка режимов работы линейного ускорителя СКИФ на стенде

3.1 Измерение поперечных размеров и эмиттанса пучка

3.1.1 Измерение поперечного профиля пучка после ВЧ пушки

Люминофорные экраны были использованы сразу же после начала работы с ускорителем, при $E_b \approx 0,5$ МэВ и даже в отсутствие триггерного импульса. Как и обычно, этот вид диагностики в силу наглядности получаемых результатов оказался востребован и популярен при настройке ускорителя. Расположение диагностических устройств, использованных при настройке ВЧ пушки, показано на рисунке 3.1.

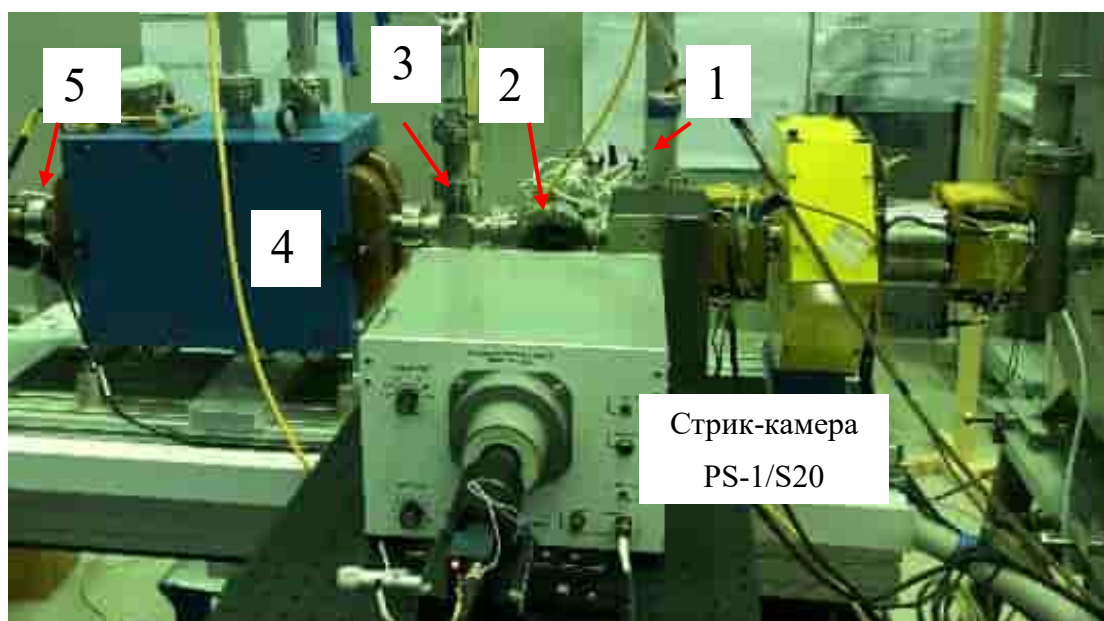


Рисунок 3.1 – Средства диагностики для отладки ВЧ пушки: 1- люминофорный экран, 2-черенковский датчик, 3 - коллиматор, 4 - спектрометр, 5 - цилиндр Фарадея

На рисунке 3.2 показано типичное изображение пучка, зарегистрированное с помощью одного из экранов. Поперечные размеры пучка соответствовали ожидаемым: $\sigma_x = 2,3 \pm 0,1$ мм, $\sigma_y = 1,5 \pm 0,1$ мм. Калибровка пространственной шкалы по обеим координатам производилась с помощью нанесенной на экран прямоугольной сетки. Точность измерения размеров пучка определялась точностью измерения размеров координатной сетки при изготовлении экранов, которая оценивается нами в 2%.

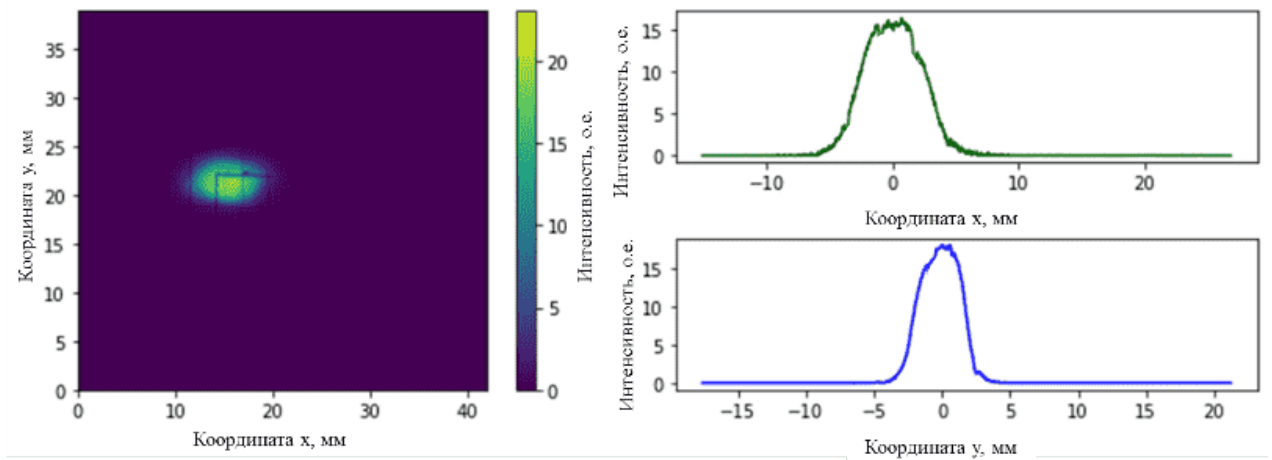


Рисунок 3.2 – Типичное изображение пучка, записанное с помощью люминофорного экрана

Экраны использовались при измерении эмиттанса пучка из ВЧ пушки методом соленоидального сканирования.

Этот метод измерения эмиттанса пучка хорошо известен. Эмиттанс пучка можно получить, измерив зависимость между поперечным размером пучка и напряженностью соленоидального поля с помощью люминофорного экрана. (рисунок 3.3), зная расстояние между соленоидом («линзой») и люминофорным экраном.

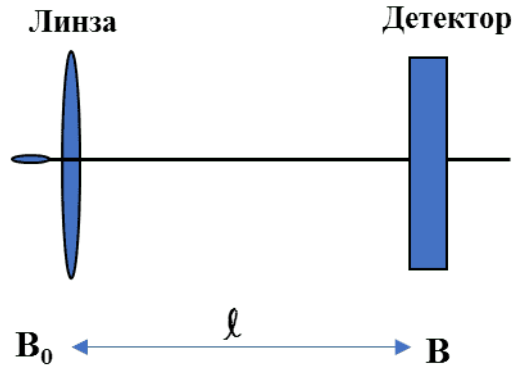


Рисунок 3.3 – Схема измерения эмиттанса пучка

Запишем матрицу B_M фазовых эллиптических коэффициентов пучка, B_{11} — квадрат поперечного размера σ пучка [52].

$$B_M = \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$\sigma^2 = \langle x^2 \rangle. \quad (3.2)$$

Матрица перехода от объектива к датчику экрана равна R_M .

$$R_M = SQ = \begin{bmatrix} S_{11} + KS_{12} & S_{12} \\ S_{21} + KS_{22} & S_{22} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

где Q_M — матрица тонких линз:

$$Q_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ K & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

где K — величина, обратная фокусному расстоянию.

Соотношение между матрицей пучка B_0 перед линзой и матрицей пучка B_1 на флуоресцентном экране выглядит следующим образом:

$$B_M = R_M B_0 R_M^T, \quad (3.5)$$

Следовательно, можно получить выражение матричного элемента B_{11} . Другими словами, B_{11} можно записать как функцию, связанную с обратной величиной K фокусного расстояния.

$$B_{11} = \langle x^2 \rangle = S_{12}^2 \langle x_0^2 \rangle K^2 + (2S_{11}S_{12} \langle x_0^2 \rangle + 2S_{12}^2 \langle x_0 x_0' \rangle) K + (S_{11}^2 \langle x_0^2 \rangle + 2S_{11}S_{12} \langle x_0 x_0' \rangle + S_{12}^2 \langle x_0'^2 \rangle). \quad (3.6)$$

Очевидно, что B_{11} по отношению к K является квадратичной функцией, поэтому, варьируя значение K линзы и измеряя соответствующий размер пучка, можно построить корреляцию:

$$B_{11}(K) = a(K - b)^2 + c = aK^2 - 2abK + (c - ab^2), \quad (3.7)$$

между σ^2 и K и аппроксимировать ее квадратичной функцией. Решая систему уравнений, можно найти элементы матрицы пучка на входе в линзу.

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle x_0^2 \rangle = \frac{a}{S_{12}^2}, \\ \langle x_0 x_0' \rangle = -\frac{a}{S_{12}^2} \left(b + \frac{S_{11}}{S_{12}} \right), \\ \langle x_0'^2 \rangle = \frac{1}{S_{12}^2} \left[ab^2 + c + 2ab \left(\frac{S_{11}}{S_{12}} \right) + a \left(\frac{S_{11}}{S_{12}} \right)^2 \right], \end{array} \right. \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\langle x_0^2 \rangle \langle x_0'^2 \rangle - \langle x_0 x_0' \rangle^2} = \frac{\sqrt{ac}}{S_{12}^2}. \quad (3.9)$$

Для измерений использовался соленоид, расположенный на расстоянии $S_{12} = 200$ мм от люминофорного экрана. Зависимость квадратов размеров пучка σ_x^2 от расчетной силы фокусировки показаны на рисунке 3.4. Измеренные эмиттансы пучка $\varepsilon = 10,9 \pm 0,3$ мм·град хорошо соответствуют данным, полученным при моделировании пушки [72].

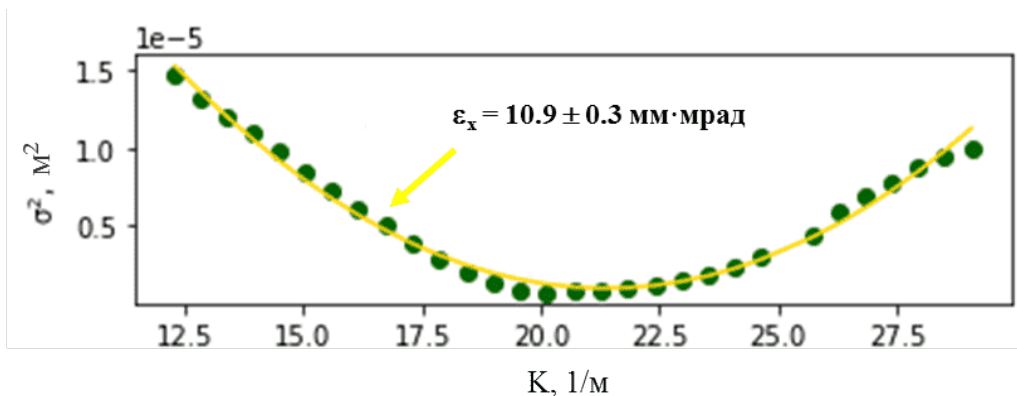


Рисунок 3.4 – Определение эмиттанса пучка ВЧ пушки с помощью соленоидального сканирования. Точность измерения размера (FWHM) $\pm 5\%$

3.1.2 Измерение поперечного профиля пучка после ускорителя-группирователя

Схема диагностики, использованной для настройки предускорителя - группирователя показана на рисунке 3.5. Полученная величина также находится в хорошем соответствии с данными численного моделирования.

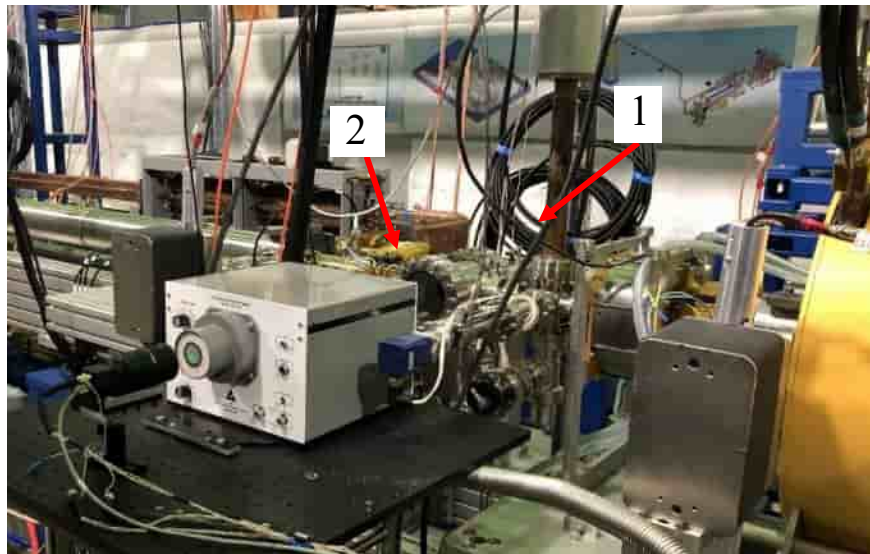


Рисунок 3.5 – Диагностическая схема после предускорителя. 1 - люминофорный экран, 2 - черенковский датчик

3.1.3 Измерение поперечных профилей пучка после ускоряющей структуры

Система диагностики после ускоряющей структуры представлена на рисунке 3.6.

Измеренное поперечное распределение пучка показано на рисунке 3.7, а размер пучка на данном этапе соответствует конструктивным параметрам линейного ускорителя.

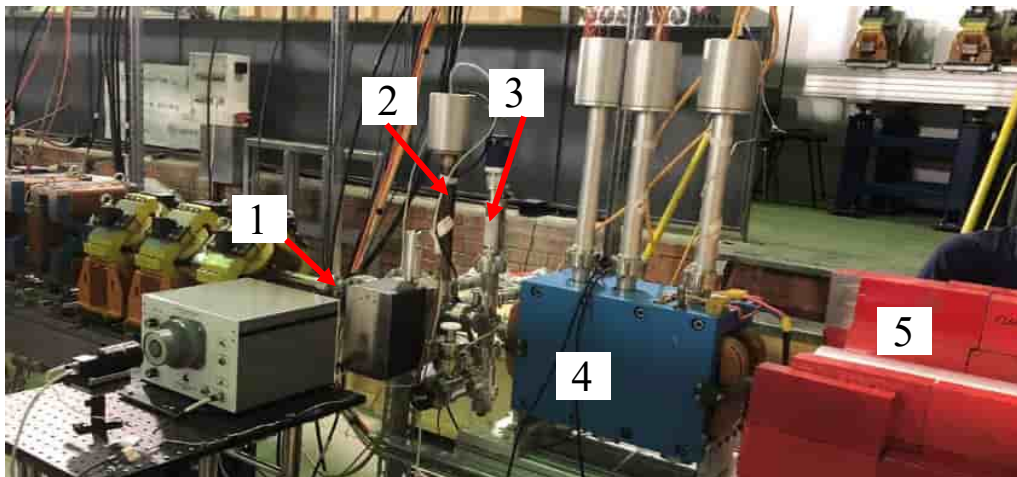


Рисунок 3.6 – Схема диагностической системы в конце прототипа линейного ускорителя. 1 - черенковский датчик, 2 - люминофорный экран, 3 - коллиматор, 4 - спектрометр, 5 - цилиндр Фарадея

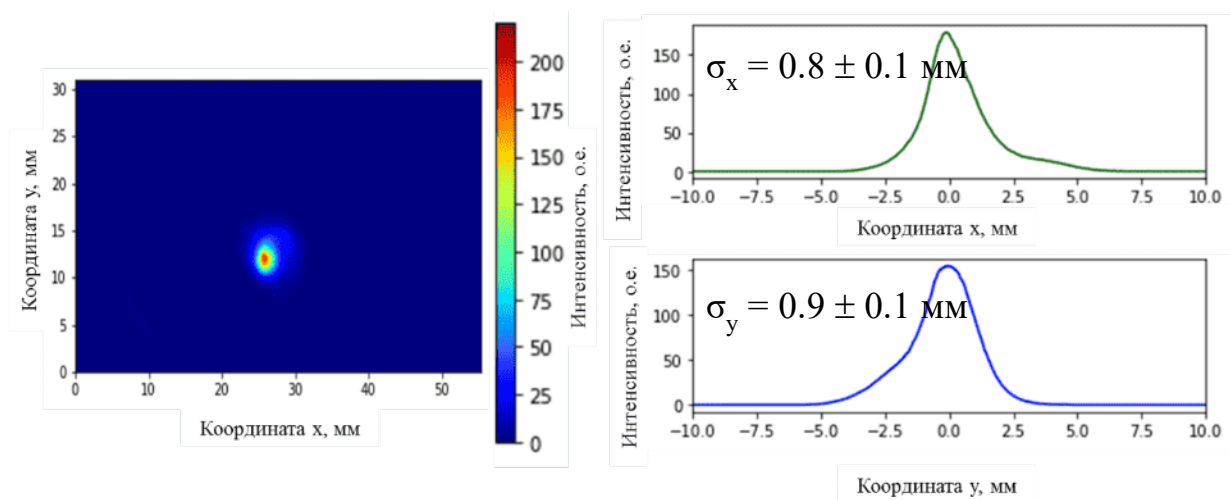


Рисунок 3.7 – Профиль пучка после ускоряющей структуры, $\sigma_x = 0,8 \pm 0,1$ мм, $\sigma_y = 0,9 \pm 0,1$ мм

Нормализованный эмиттанс пучка, измеренный после ускоряющей структуры тем же методом, что и в разделе 3.1.1, показан на рисунке 3.8. Его величина равна $\epsilon_x = 40 \pm 0,3$ мм·мрад.

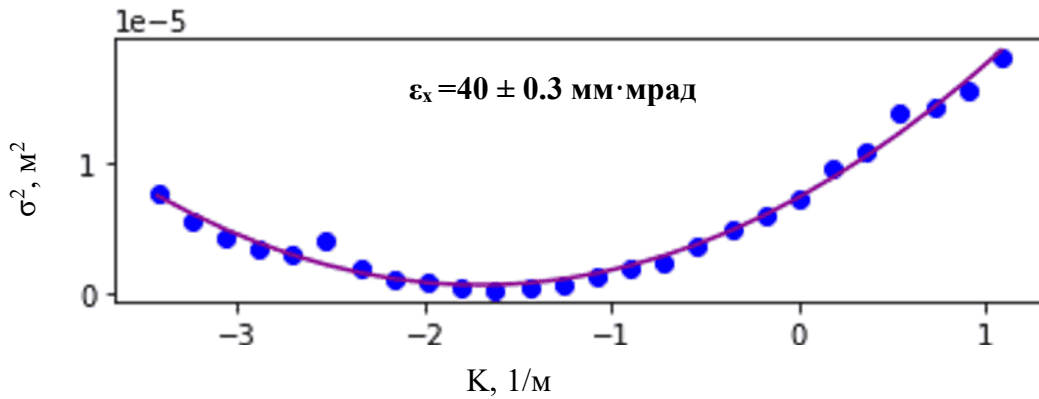


Рисунок 3.8 – Определение эмиттанса пучка с помощью квадрупольного сканирования после ускоряющей структуры при энергии пучка $E_b = 32 \text{ МэВ}$ и длительности $\tau_b = 25 \pm 3 \text{ пс}$ (FWHM). Точность измерения размера (FWHM) $\pm 5\%$

3.2 Измерение энергии и энергетического разброса пучка

3.2.1 Измерение энергии и энергетического разброса пучка после ВЧ пушки

На первом этапе настройки ускорителя дипольный магнитный спектрометр применялся для измерения энергии и энергетического разброса пучка из ВЧ пушки. Для этого использовался первый из люминофорных экранов спектрометра, расположенный на расстоянии 100 мм от входа в спектрометр. При энергии электронов $E_b \approx 0,6 \text{ МэВ}$ напряженность магнитного поля, при котором пучок попадает в центр экрана, составляет приблизительно 120 Гс. Ток в источнике питания спектрометра задается при помощи 12 разрядного цифро-аналогового преобразователя в диапазоне 0 - 30 А. Сила тока, соответствующая указанной напряженности поля, равна 4,5 А, т.е. точность установки поля лучше 1 Гс. Эта величина определяет относительную погрешность определения энергии. Другим важным параметром, влияющим на точность измерения энергии пучка, является погрешность, с которой измеряется расстояние между точкой, соответствующей нулевому значению напряженности магнитного поля на входе в спектрометр, и центром люминофорного экрана. По данным магнитных изме-

рений на стенде эта величина составляет $100 \pm 0,5$ мм. В итоге, относительную точность измерения энергии можно определить в 1%.

В действительности оказалось, что гораздо более сильное влияние на точность измерений оказывает траектория пучка: расстояние до оси магнитного поля соленоида и угол влета в магнитное поле соленоида. К сожалению, настройке траектории пучка в первых экспериментах с ВЧ пушкой не было уделено достаточно внимания, из-за чего измеренная спектрометром энергия была сильно завышена по сравнению с проектным значением. В связи с принятым решением перейти к отладке полноразмерной конфигурации линака и перестановкой спектрометра на выход ускорителя, после ускоряющей структуры, вернуться к измерениям энергии пушки с помощью спектрометра не представлялось возможным.

Для разрешения возникшего противоречия энергия пучка из ВЧ пушки была измерена при помощи дипольного корректора MG-LG.СК4 и люминофорного экрана VI-LG.PL2 (рисунок 3.9).

Энергия пучка рассчитывалась по смещению его изображения на люминофорном экране в зависимости от тока в корректоре (рисунок 3.10). Карта поля корректора была отснята при изготовлении этого магнитного элемента. Точность определения координаты центра тяжести полученных изображений оценивается в 5% от FWHM, что определяется точностью подгонки полученных распределений с помощью встроенной функции `python`. На рисунке 3.11 (слева) приведено сравнение результатов моделирования смещения пучка с помощью пакета FLUKA и экспериментальных результатов, соответствующих энергии пучка $E_b = 0,6 \pm 0,03$ МэВ.

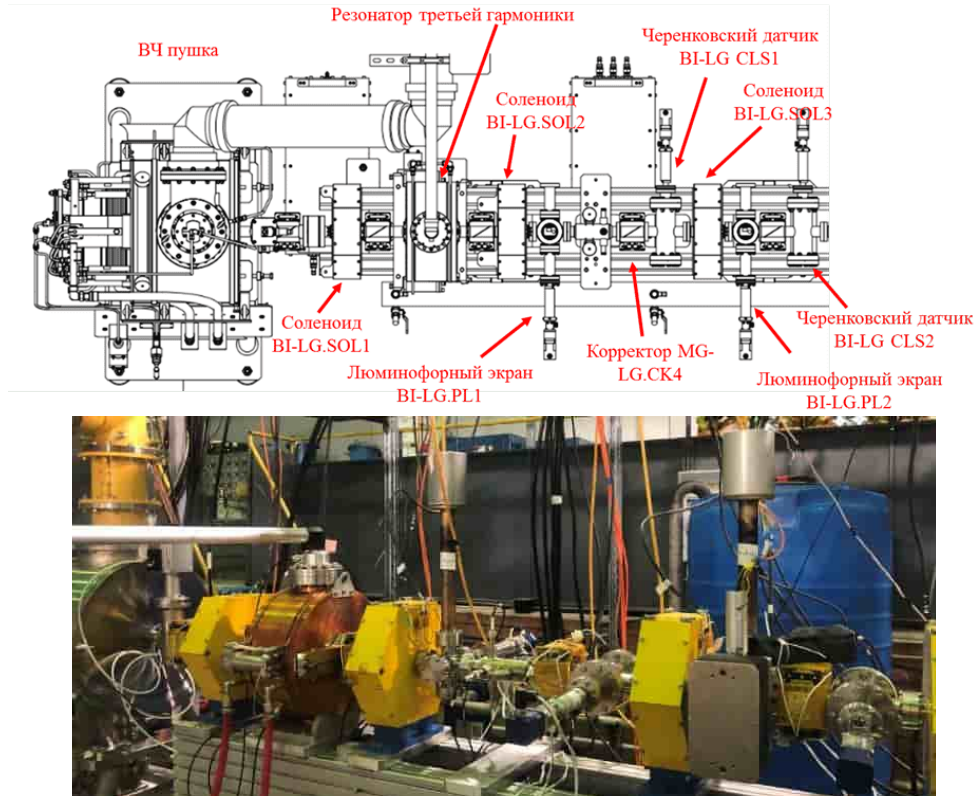


Рисунок 3.9 – Схема участка ускорительного тракта, где расположены корректор и люминофор (вверху). Внешний вид соответствующих элементов в зале ускорителя (внизу)

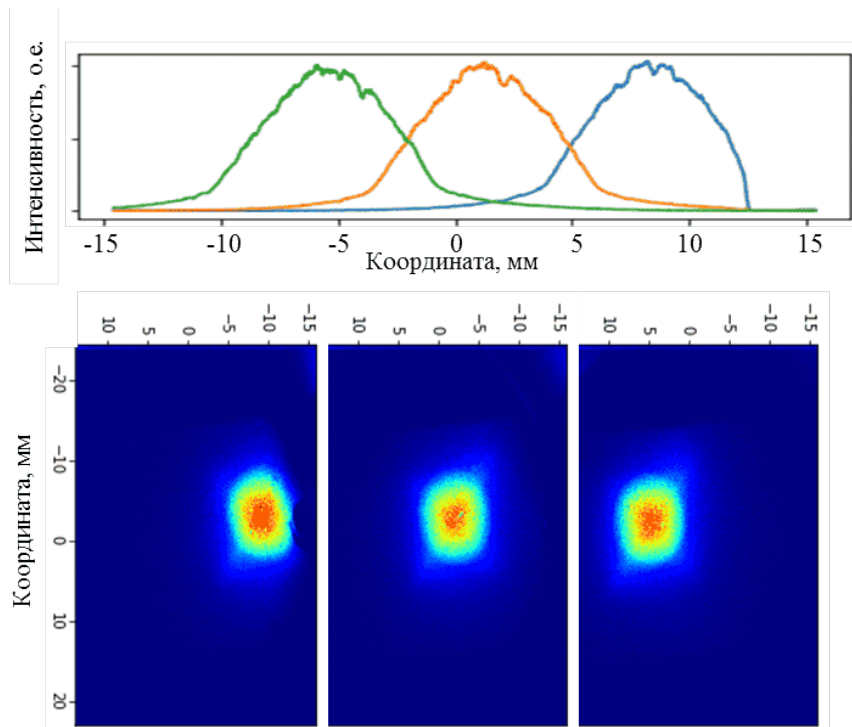


Рисунок 3.10 – Центр тяжести изображения, записанного на люминофоре, смещается при изменении тока корректора

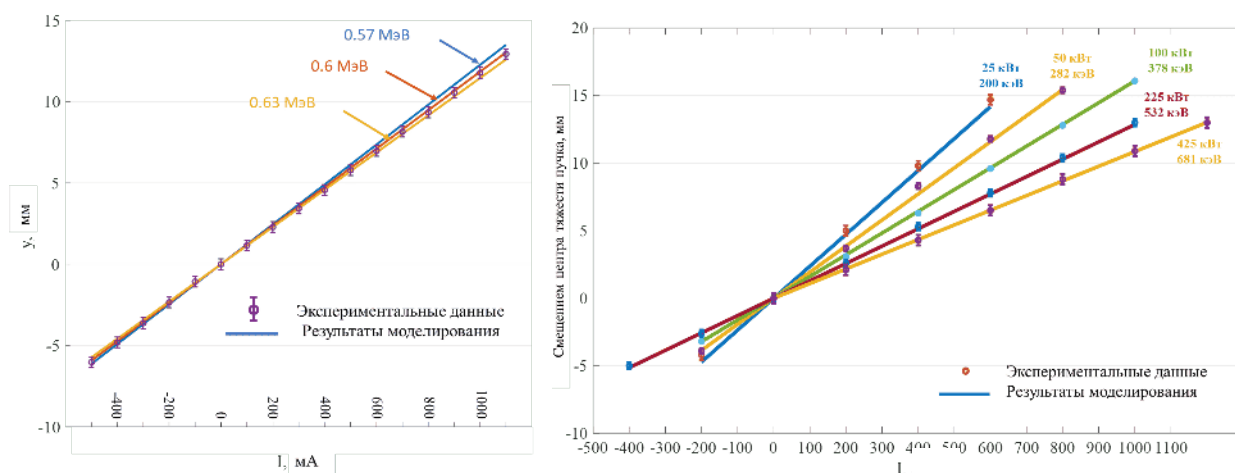


Рисунок 3.11 – Измерение энергии пучка по его смещению на люминофорном экране под действием магнитного корректора

Аналогичным методом была измерена зависимость энергии пучка от ВЧ мощности, приложенной к резонатору ВЧ пушки. Соответствующие зависимости представлены на рисунке 3.11 (справа), а на рисунке 3.12 показано найденное соотношение между измеренным значением энергии пучка и ВЧ мощностью, приложенной к резонатору пушки.

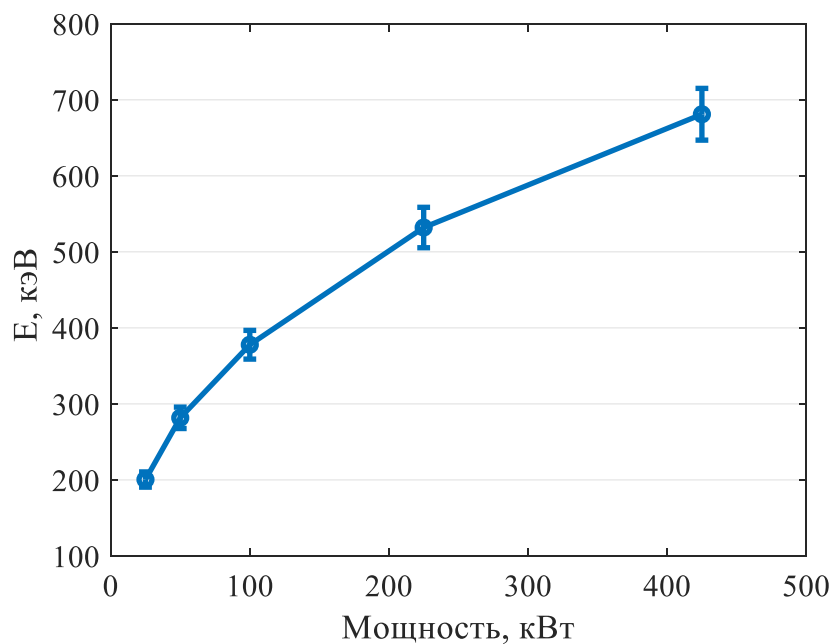


Рисунок 3.12 – Измеренные энергии пучка в зависимости от ВЧ мощности, приложенной к резонатору пушки

Измерение энергетического разброса пучка ВЧ-пушки производилось при коллимировании его поперечного сечения на входе в спектрометр (рисунок 3.13). Полученная величина разброса равна $\sigma_E = 35 \pm 7$ кэВ. Ширина щели коллиматора 0,5 мм соответствует энергетическому диапазону 12,5 кэВ на люминофорном экране спектрометра и определяет аппаратную функцию прибора.

Малый объем экспериментальных данных объясняется недостатком времени для проведения подробных измерений. После того, как стало ясно, что пушка работает в режиме, близком к расчетному, была проведена полная сборка линейного ускорителя, вместе с предускорителем-группирователем и ускоряющей секцией, а спектрометр и цилиндр Фарадея перенесены к выходу установки (рисунок 2.5 и рисунок 3.6).

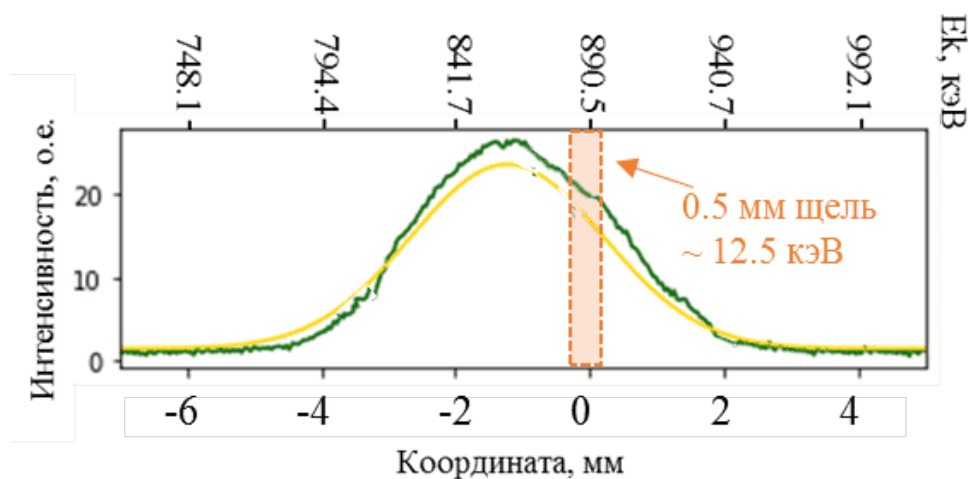


Рисунок 3.13 – Определение энергетического разброса пучка с помощью магнитного спектрометра. Зеленая кривая – зарегистрированный профиль пучка, желтая кривая – подгонка Гауссовым распределением

3.2.2 Измерение энергии пучка после ускорителя-группирователя

Энергия пучка после предускорителя также измерялась указанным выше методом с помощью корректора и люминофорного экрана, $E_k = 1,77 \pm 0,03$ МэВ (рисунок 3.14).

Полученное значение энергии соответствует пониженной мощности клистрона. Эти измерения были проведены с целью проверки корректности работы черенковского датчика, так как возникли сомнения, достигает ли энергия пучка порогового значения эффекта Черенкова в кварцевом аэрогеле. Как видно, метод измерения энергии оказался вполне универсальным, хотя и времязатратным.

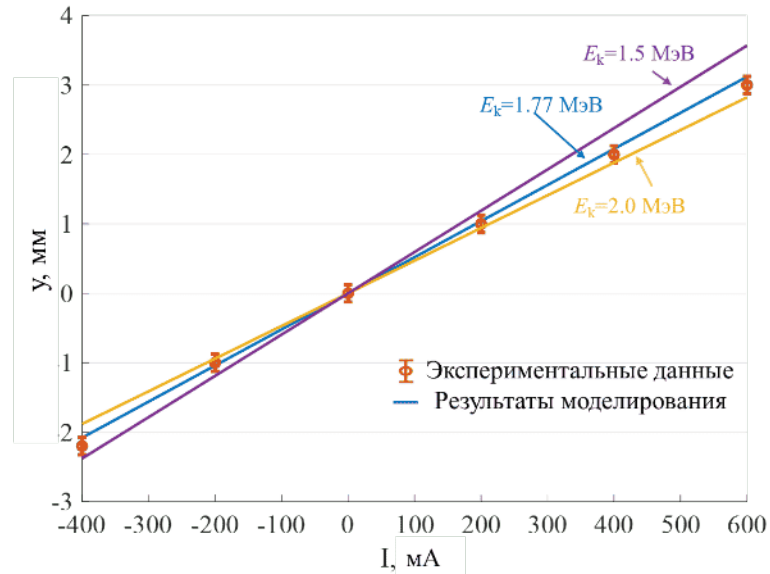


Рисунок 3.14 – Смещение пучка в зависимости от тока корректора

3.2.3 Измерение энергии и энергетического разброса пучка после ускоряющей структуры

Дипольный магнитный спектрометр был использован для измерения энергии пучка после ускоряющей секции. Для перекрестного контроля в каждом измерении использовались два люминофорных экрана спектрометра, расположенные на расстоянии 200 и 350 мм от входа (рисунок 3.15).

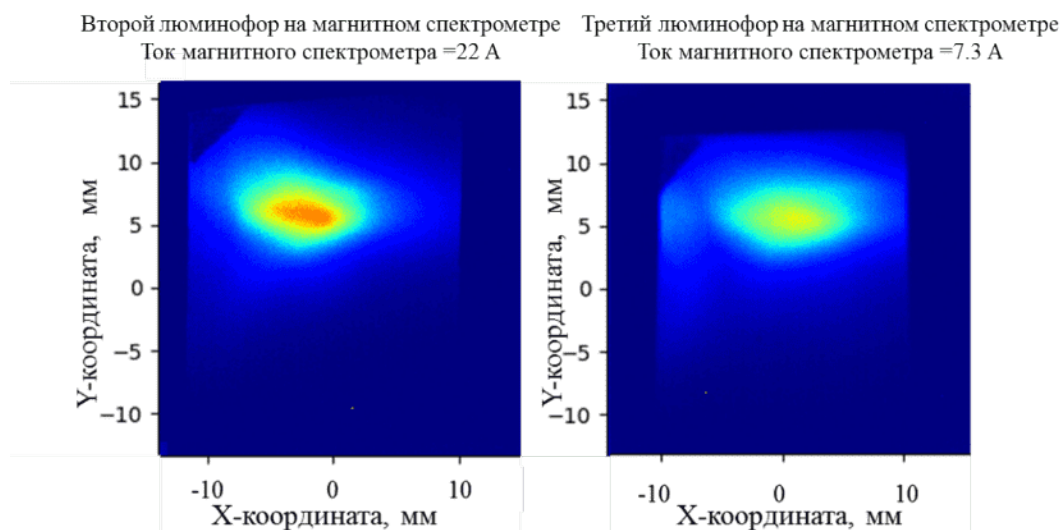


Рисунок 3.15 – Изображения пучка регистрируются при одинаковой энергии двумя люминофорными экранами спектрометра, расположенными на расстоянии 200 и 350 мм от входа соответственно. $E_b = 27 \pm 0,3$ МэВ

Для оценки разрешающей способности спектрометра определялось минимальное определяемое смещение изображения пучка на люминофорном экране при фиксированной энергии пучка, вызванное изменением магнитного поля спектрометра. Следует подчеркнуть, что речь идет именно об оценке, поскольку точность определения максимума в изображении пучка на люминофорном экране, зависит и от ширины этого изображения, которое определяется энергетическим разбросом пучка. В приведенном ниже примере энергетический разброс был достаточно велик и составлял $\Delta E = 3,3$ МэВ (FWHM).

На рисунке 3.16 показаны два профиля пучка на 3-м люминофорном экране, удаленном от входа на 350 мм, при $E_b = 31,4$ МэВ, зарегистрированные при изменении магнитного поля на $\Delta B = 4$ Гс, что эквивалентно изменению энергии пучка на $\Delta E = 0,4$ МэВ. Смещение профилей пучка надежно определяется, т.е. энергетическое разрешение спектрометра около 1%. На рисунке 3.17 показано смещение максимума изображения на 2-м экране в зависимости от тока в дипольном магните спектрометра при той же энергии пучка.

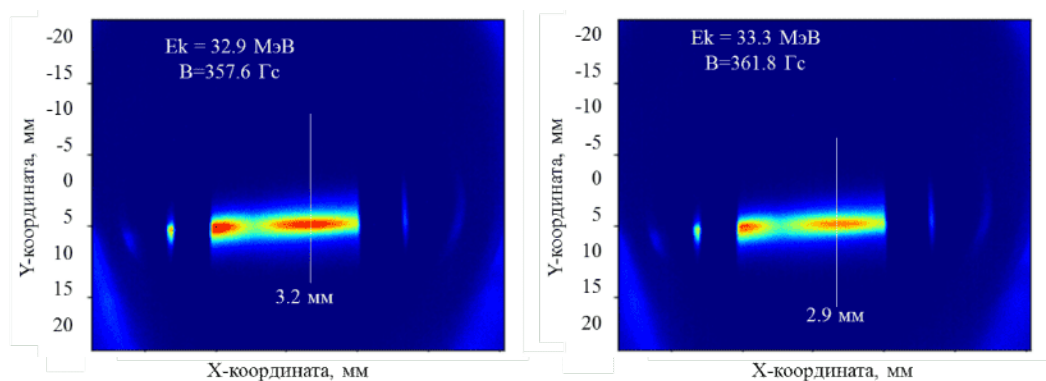


Рисунок 3.16 – Изображение пучка на 3-м люминофорном экране спектрометра при одинаковой энергии и разных токах в дипольном магните

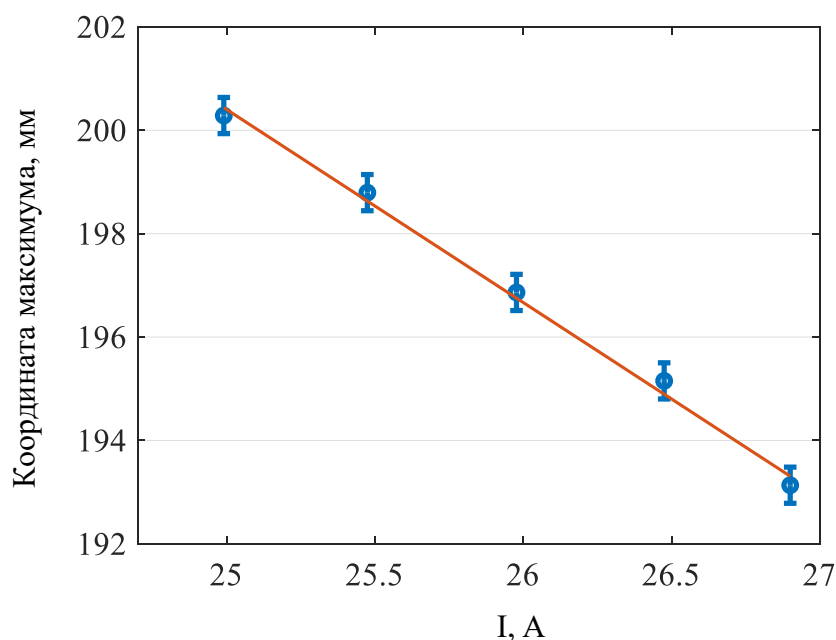


Рисунок 3.17 – Зависимость смещения максимума изображения пучка на 2-м люминофорном экране магнитного спектрометра в зависимости от тока диполя

При изменении тока в обмотке на 2А магнитное поле в спектрометре изменилось на 80 Гс, что эквивалентно изменению энергии пучка на 2,5 МэВ. При этом точность определения координаты максимума изображения пучка не хуже 0,5 мм, т.е. энергетическое разрешение прибора не хуже 0,2 МэВ. Таким образом, точность определения энергии пучка с помощью спектрометра не хуже 1%.

В приведенных выше примерах пучок имел большой энергетический разброс, так как в структуре ускорителя не действовал группирователь на третьей

гармонике. Именно с этим связано появление второго максимума, заметного на рисунке 3.16.

Включение группирователя третьей гармоники привело к уменьшению энергетического разброса пучка. Его величина была определена с использованием коллиматора на входе спектрометра. Изображение, записанное на третьем люминофорном экране магнитного спектрометра, показано на рисунке 3.18. Энергия пучка при этих измерениях была равна $E_b = 32$ МэВ. Таким образом, относительное значение энергетического разброса $\sigma_E = 2\%$, что позволяет надеяться на получение проектных значений при $E_b = 200$ МэВ. Кроме того, во время этих измерений расчетная длительность пучка еще не была достигнута.

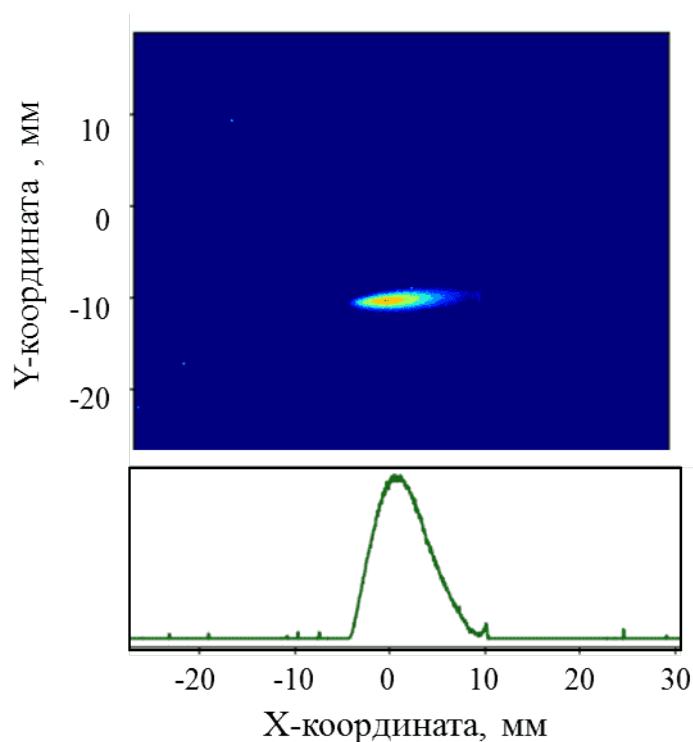


Рисунок 3.18 – Пучок регистрируется третьим люминофорным экраном магнитного спектрометра для определения энергетического разброса. Ширина пучка на полувысоте 6,8 мм. Измеренная величина энергетического разброса: $\Delta E = 1,6 \pm 0,1$ МэВ (FWHM)

3.3 Измерение заряда пучка с помощью цилиндра Фарадея

Как уже упоминалось, диагностики вводились в строй по мере готовности узлов ускорителя. В первую очередь цилиндр Фарадея был использован для измерения заряда пучка из ВЧ пушки. Энергия электронов, ускоренных в пушке, составляла 0,6 МэВ. Длина пробега электронов с такой энергией в любом проводящем материале составляет доли миллиметра. В связи с этим никаких специальных расчетов поглощения частиц для ЦФ, измерившего заряд пучка из пушки, не проводилось, и его специальная конструкция не разрабатывалась. В качестве ЦФ была использована высоковакуумная часть ввода ВЧ мощности, имевшая керамическую вставку, позволявшую оторвать приемник пучка от земли. Измеренная емкость на землю приемника пучка составляла 2 пФ.

Для защиты входа осциллографа от перегрузки ЦФ был шунтирован варистором и искровым разрядником. Коаксиальный кабель присоединялся к ЦФ с помощью специальных контактных площадок для снижения паразитной индуктивности (рисунок 3.19 слева). Схема регистрации сигнала с ЦФ широкополосным осциллографом показана на рисунке 3.19 (справа). Типичный сигнал с ЦФ показан на рисунке 3.20.

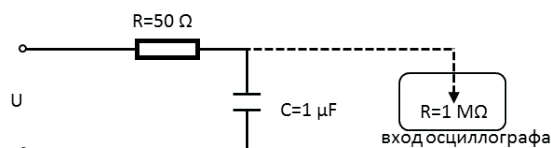
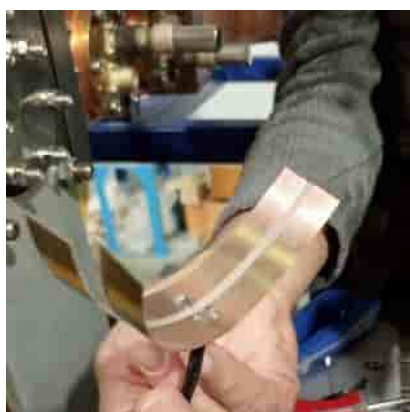


Рисунок 3.19 – Слева: контактные площадки для сигнального кабеля ЦФ, снижающие паразитную индуктивность. Справа: схема подключения ЦФ для регистрации широкополосного сигнала

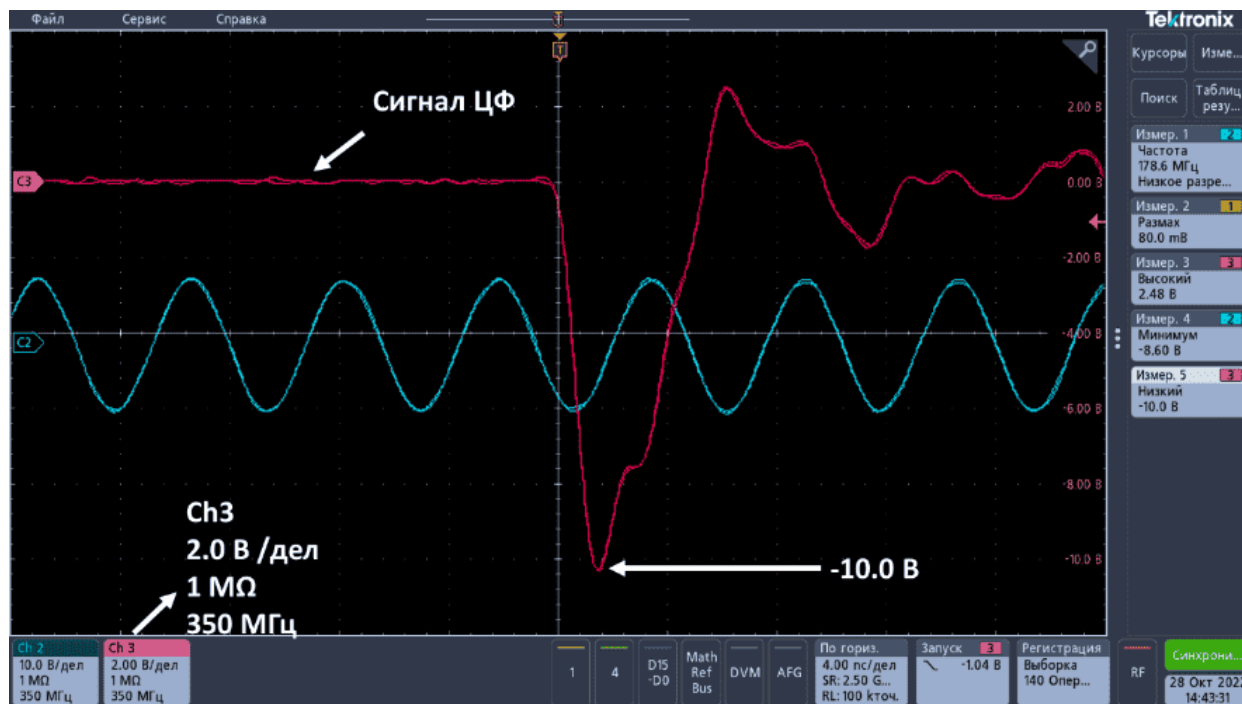


Рисунок 3.20 – Типичный сигнал с ЦФ при измерениях заряда ВЧ пушки

Заряд пучка вычислялся численным интегрированием зарегистрированной осциллограммы.

Использование только высокоомного ($R = 1 \text{ Мом}$) входа осциллографа для регистрации сигнала ЦФ приводило к появлению колебаний большой амплитуды на заднем фронте (рисунок 3.21), что объясняется малой величиной емкости ЦФ и малой длительностью пучка. Режим работы на высокоомный вход применялся при измерении темновых токов ВЧ пушки, имеющих длительность в десятки микросекунд.

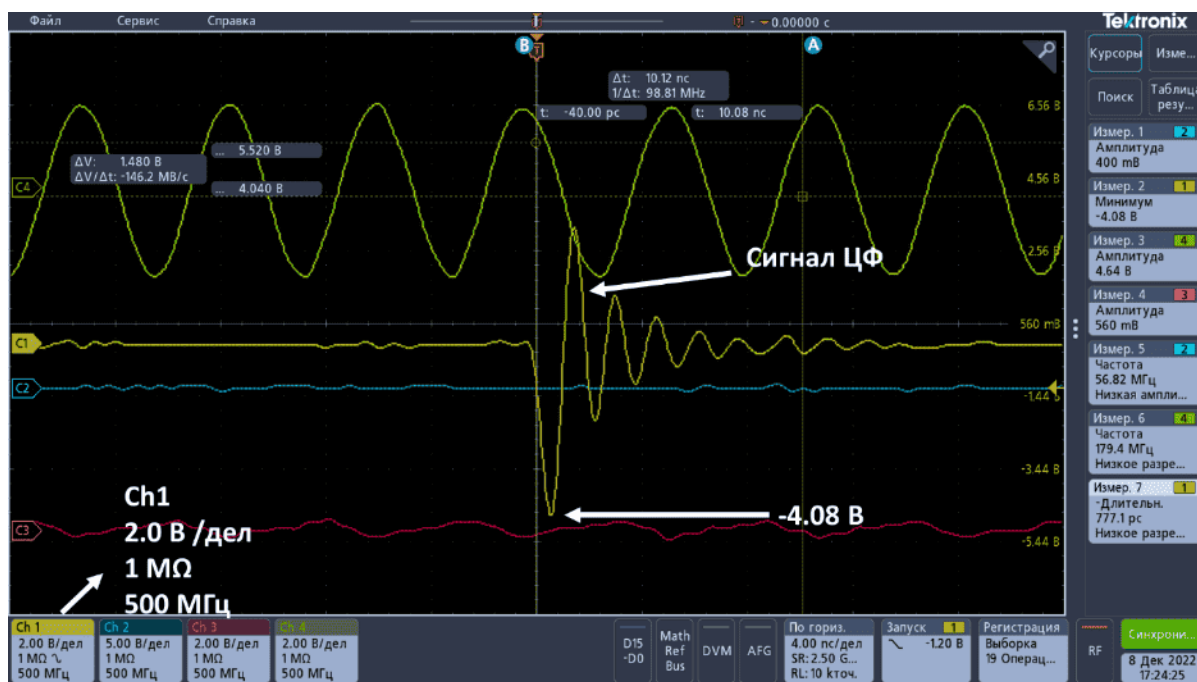


Рисунок 3.21 – Сигнала ЦФ при работе на высокоомный вход осциллографа ($R = 1 \text{ МОм}$)

Зависимость между зарядом пучка и напряжением смещения ВЧ-пушки показана на рисунке 3.22.

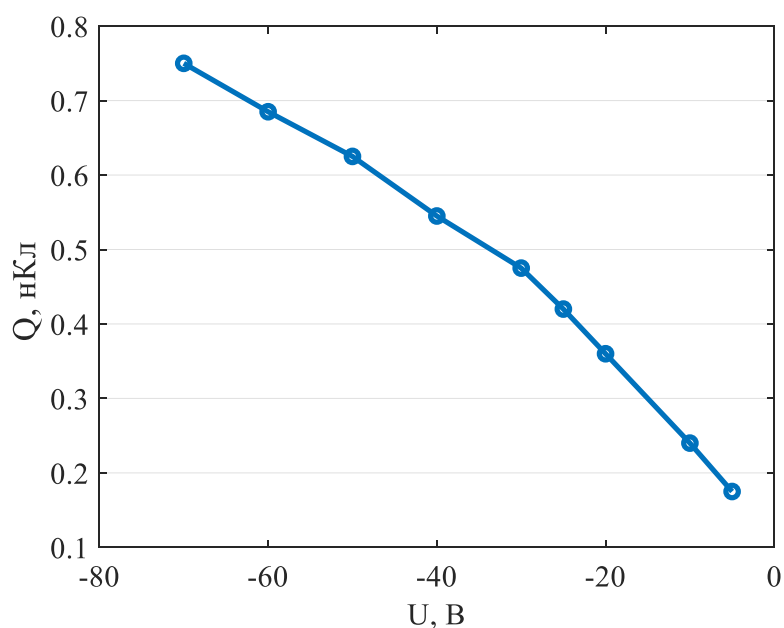


Рисунок 3.22 – Заряд пучка ВЧ пушки в зависимости от напряжения смещения на модулирующей сетке

Предполагалось, что этот же цилиндр Фарадея будет использован и при энергии пучка $E_b = 3$ МэВ, после ускорителя-группирователя, но в силу сжатости сроков ввода линака в строй этот этап настройки был пропущен и следующая рабочая конфигурация установки представляла собой полноразмерную версию ускорителя, поэтому далее в качестве поглотителя пучка использовался массивный цилиндр из Д16Т, а пучок для измерений заряда выводился из вакуумной камеры через разделительную титановую фольгу (рисунок 3.23).



Рисунок 3.23 – Внешний вид линейного ускорителя и вторая версия ЦФ крупным планом

Габариты ЦФ обеспечивали полное поглощение электронов с энергией 32 МэВ (рисунок 3.24).

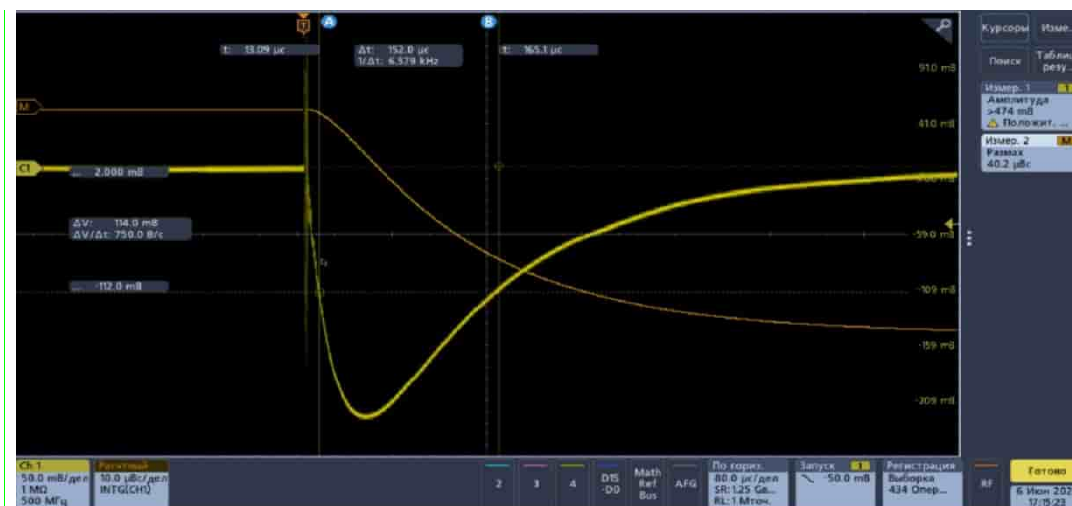


Рисунок 3.24 – Сигнал с ЦФ, установленного после ускоряющей структуры для измерения заряда пучка с энергией $E_b = 32$ МэВ и более

3.4 Измерение продольного распределения заряда в пучке с помощью черенковских датчиков

3.4.1 Измерение продольного профиля пучка после ВЧ пушки

Схема измерений показана на рисунке 3.25. На участке от ВЧ пушки до предускорителя-группирователя расположен резонатор третьей гармоники, используемый для продольной группировки пучка. Поэтому исследование продольного профиля производилось в двух точках, до резонатора и после него.

Первое измерение продольного профиля пучка из ВЧ пушки при $E_b = 600$ кэВ было проведено с черенковским датчиком, конструкция которого показана на рисунках 2.45-2.46 и кварцевой пластиной в качестве радиатора. Напомним, что при этой энергии пучка электроны испытывают сильное рассеяние в кварце и полностью поглощаются на длине 0,5 мм. Черенковское излучение, вследствие этого, имеет широкое угловое распределение на выходе из кварцевой пластины (рисунок 2.43). В результате, коллимирующий конус работает не вполне эффективно, как показано на рисунке 3.26.

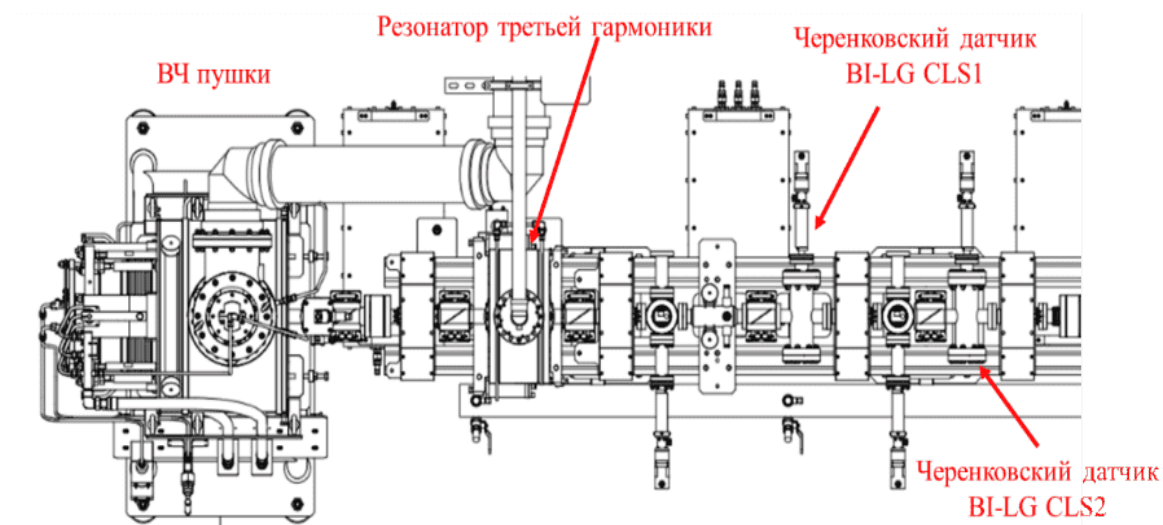


Рисунок 3.25 – Схема измерений продольного профиля пучка после ВЧ пушки

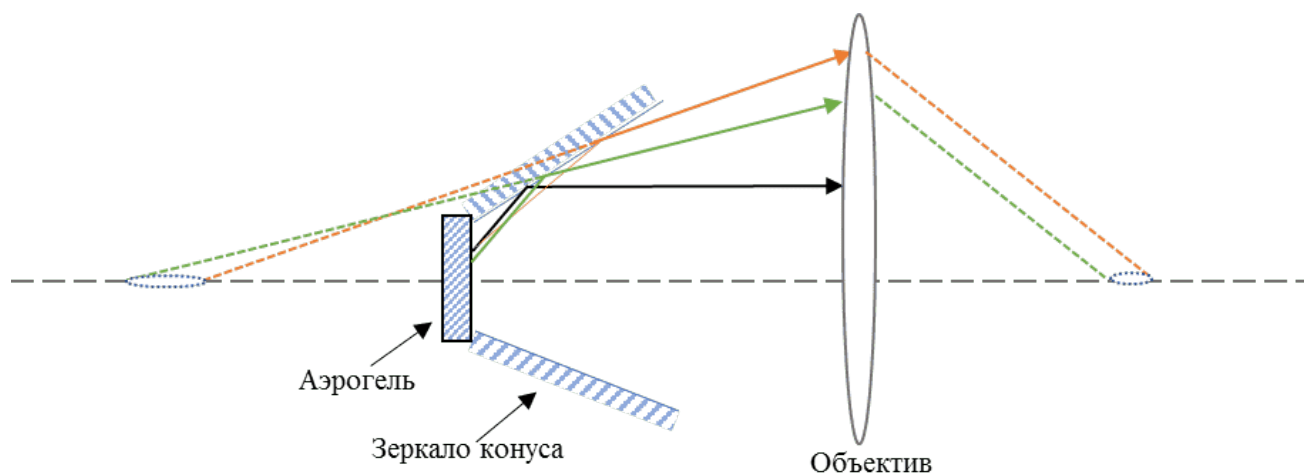


Рисунок 3.26 – Схема расчета по геометрической оптике черенковского датчика для большого углового разброса излучения

Таким образом, на фотокатоде стрик-камеры строится не изображение пучка, а проекция длинного отрезка на оптической оси, что следует из элементарных соображений.

Мы располагали только одной рабочей сменой, а фактически 3-4 часами для настройки стрик-камеры, и успели лишь убедиться, что количества черенковских фотонов достаточно для регистрации продольного профиля пучка. Стрик-камера, работавшая в режиме «фокус», была настроена на изображение светящегося термокатаода ВЧ-пушки, хорошо видимого сквозь кварцевый радиатор. Зарегистрированное изображение показано на рисунке 3.27.

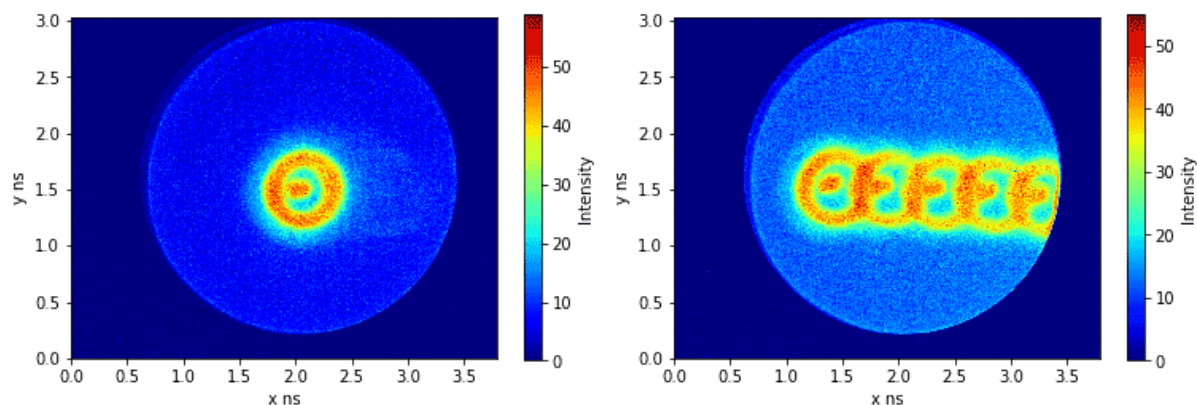


Рисунок 3.27 – Изображение пучка в черенковском свете, но не то, что обычно подразумевают под черенковскими кольцами. Слева: один сгусток в пучке, справа: 5 сгустков в пучке

Это изображение получено в режиме «streak», но при длительности развертки стрик-камеры много больше длительности пучка. В этом режиме все «медленные» изображения, такие, как катод пушки, растягиваются разверткой камеры и перестают быть видны. Сразу заметим, что внешнее кольцо на изображении – это образующая зеркальной поверхности конуса, а не то, что подразумевают под «черенковским кольцом». Жирная точка в центре – это изображение пучка, построенное объективом на фотокатоде стрик-камеры, но только за счет фотонов в пределах телесного угла, меньшего, чем угол раствора коллимирующего конуса. Пять колец на рисунке 3.27 – это изображение пяти сгустков в пучке линака, который был специально включен в многосгустковый режим для настройки диагностики. Отдельное кольцо соответствует отдельному сгустку, временной интервал между сгустками, определенный по зарегистрированному изображению, равен 5,6 нсек, в полном соответствии с частотой следования $f = 178,5$ МГц.

Дальнейшие измерения продольного профиля пучка проводились в дрейфовом промежутке после резонатора третьей гармоники. При этом в конструкцию черенковского датчика были внесены следующие изменения:

1. Коллимирующий зеркальный конус заменен на полый цилиндр из нержавеющей стали.

2. Одна поверхность кварцевого радиатора заматирована, а на вторую, обращенную к пучку, нанесено зеркальное алюминиевое покрытие.

Тем самым, пучок излучал в кварце диффузно распределенный черенковский свет, попадавший во входной зрачок объектива Zenit Zenitar 50mm f/1.2. Мы отважились на этот шаг, несомненно, ухудшавший временное разрешение диагностики, поскольку расчетная длительность пучка составляла сотни пикосекунд.

Полученные продольные профили пучка представлены на рисунках 3.28–3.31. Отметим сразу, что количества фотонов при заряде пучка 0,5 – 1 нК оказалось вполне достаточно для надежного проведения измерений. Временное разрешение диагностики 8 пс (FWHM) ограничивалось достигнутым размером пучка на фотокатоде стрик-камеры. В подтверждение этого тезиса на рисунке 3.31 совмещены горизонтальный и вертикальный профили зарегистрированного изображения. Как видно, левый склон горизонтального изображения практически совпадает с левым склоном вертикального изображения. Это говорит о том, что аппаратная функция стрик-камеры определяется резкостью фокусировки. На этом этапе мы не стали принимать дополнительных мер для ее улучшения.

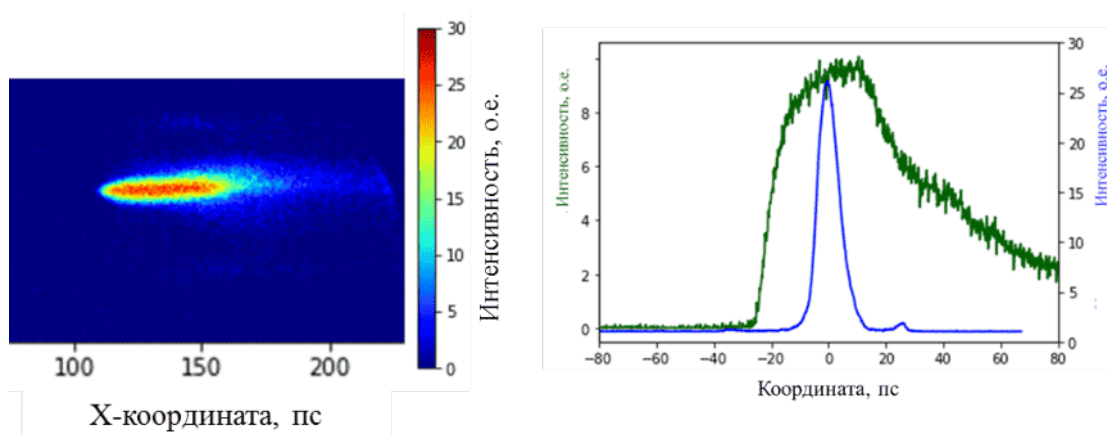


Рисунок 3.28 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 65$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = $-0,78$ рад, фазе пушки = 99° , напряжение модулятора $U_m = 70$ В

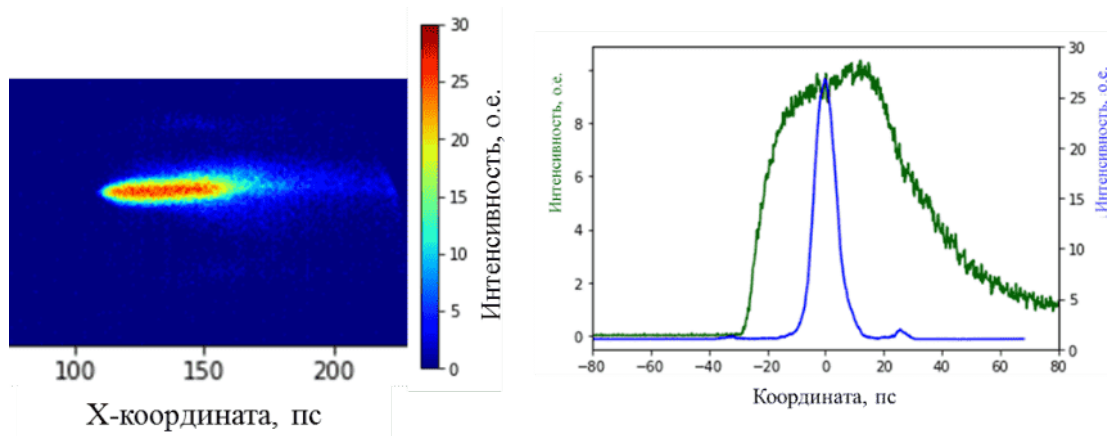


Рисунок 3.29 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 56,1$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = $-0,58$ рад, фазе пушки = 99° , напряжение модулятора $U_m = 70$ В

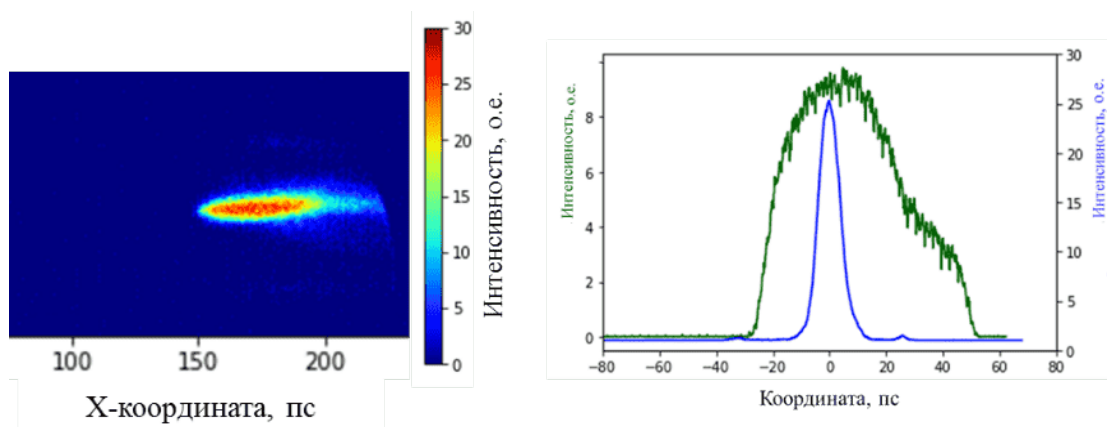


Рисунок 3.30 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 50$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = $-0,38$ рад, фазе пушки = 99° , напряжение модулятора $U_m = 70$ В

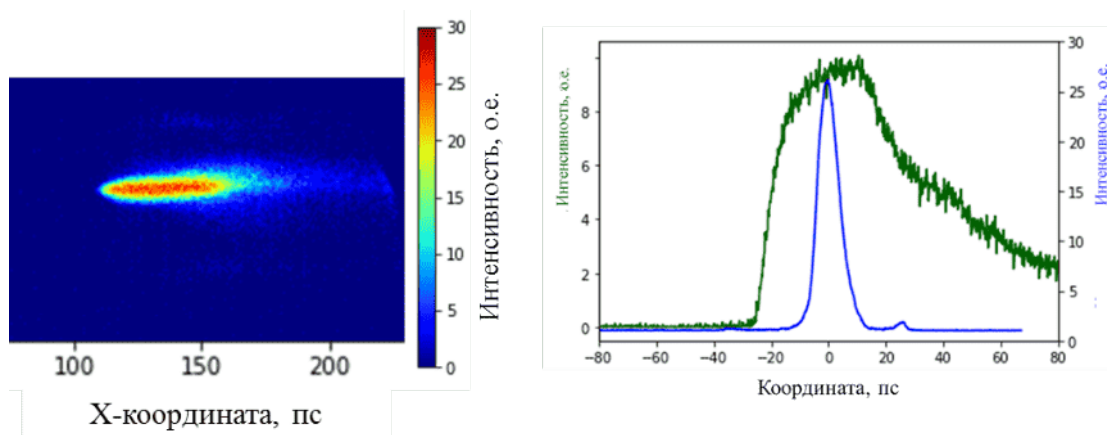


Рисунок 3.31 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 60$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = $-0,58$ рад, фазе пушки = 76° , напряжение модулятора $U_m = 50$ В

На рисунке 3.32 совмещены результаты моделирования в пакете ASTRA [73] (синяя кривая и точки) и результаты измерений (красные точки) зависимости длины пучка FWHM от фазы ВЧ напряжения на резонаторе пушки.

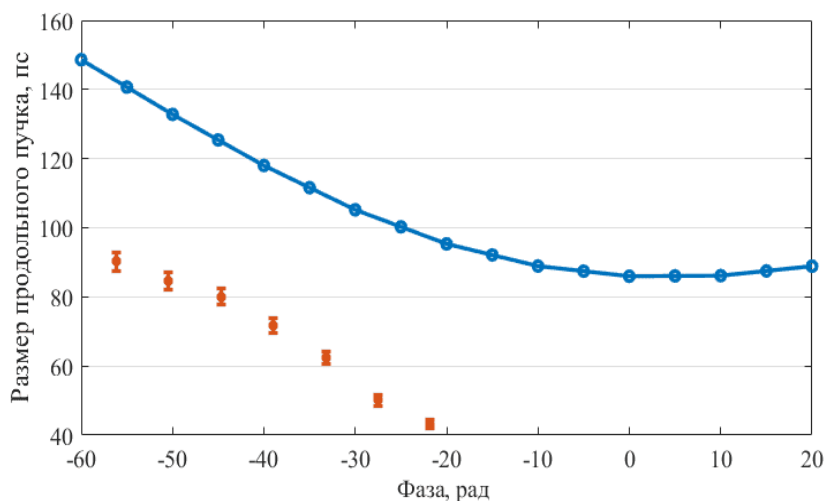


Рисунок 3.32 – Продольные размеры пучка, зарегистрированные при разных фазах резонатора ВЧ пушки первым черенковским датчиком при напряжении модулятора $U_m = 70$ В. Резонатор третьей гармоники включен

Согласие между двумя зависимостями скорее качественное, демонстрирующее возможность существенного уменьшения длины пучка перед его про-

хождением через ускоритель-предгруппирователь. Это не должно вызывать удивления, так как результатом моделирования является продольная дисперсия пучка, но на практике его форма далека от Гауссовой.

3.4.2 Измерение продольного профиля пучка после предускорителя-группирователя (третий черенковский датчик)

Так как энергия пучка после предускорителя-группирователя достигает 3 МэВ, а расчетная длительность пучка составляет менее 5 пс (FWHM), то в качестве радиатора третьего черенковского датчика оправданно применить кварцевый аэрогель. Из-за малой величины коэффициента преломления аэрогеля $n = 1,05$ черенковский угол оказывается равен $\theta \approx 16^\circ$, т.е. угол раствора коллимирующего зеркального конуса датчика (рисунок 2.44) около 18° . Временное разрешение диагностики будет определяться размером, в который удастся сфокусировать черенковский свет из аэрогеля. Это размер зависит, как следует из данных моделирования, от рассеяния электронов в веществе аэрогеля.

Отдельно следует остановиться на вакуумных свойствах использованного аэрогеля. Большая пористость этого материала вызывает справедливые опасения относительно возможности его применения в высоком вакууме. Например, в [74] принимались специальные меры для уменьшения газоотделения радиатора. Мы также уделили отдельное внимание этой проблеме. Образец аэрогеля, из которого был изготовлен наш радиатор, был испытан на специальном высоковакуумном стенде. Выяснилось, что после прогрева до 200° газоотделение аэрогеля не превышало газоотделение нержавеющей стали. В дальнейшем мы не испытывали никаких проблем с вакуумом в ускорителе и при работе с пучком, пролетавшим сквозь аэрогель.

Первые результаты с третьим черенковским датчиком были получены с выключенным резонатором третьей гармоники. На рисунке 3.33 показан многобанчевый режим работы ускорителя, зарегистрированный при развертке 30 нс. Так как энергия электронов выросла до 3 МэВ, и благодаря низкой плотности

аэрогеля, удалось получить корректный режим работы оптической схемы и размер сфокусированного пятна на фотокатоде стрик-камеры, соответствующий временному разрешению $\tau_{af} = 5$ пс FWHM на развертке 0,25 нс.

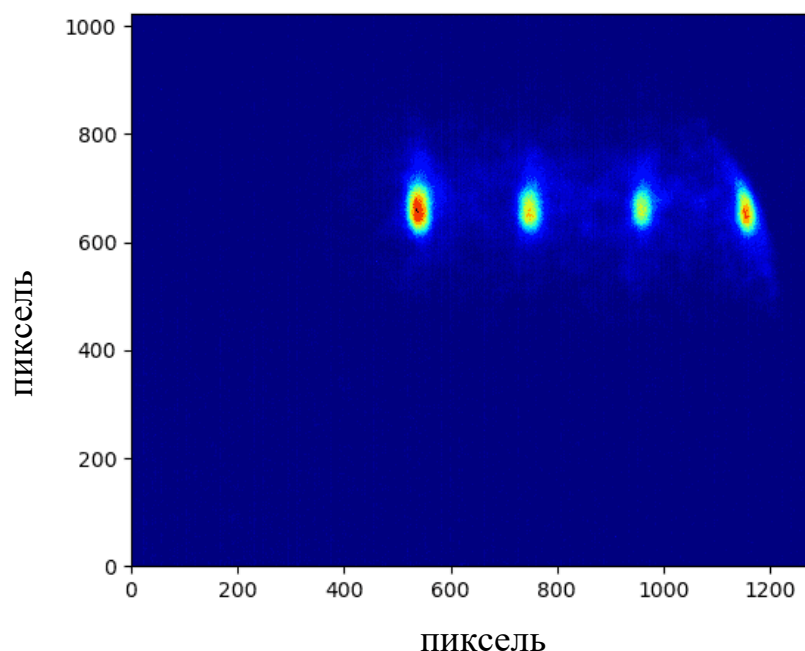


Рисунок 3.33 – Регистрация многосгусткового режима работы ускорителя при развертке стрик-камеры 30 нс. Продольный профиль одного сгустка не удается разрешить во времени. Однако при развертке камеры 0,25 нс полуширина изображения сгустка соответствует временному интервалу 5 пс, что достаточно для исследования его продольного профиля

Длительность одного сгустка оказалась равной $\tau_b = 12 \pm 3$ пс. Характерные зарегистрированные изображения представлены на рисунке 3.34.

Величина τ_b определялась как $\tau_b = \sqrt{\tau_0^2 - \tau_{af}^2}$, где τ_0 – ширина на полувысоте FWHM исходного изображения сгустка, τ_{af} – аппаратная функция.

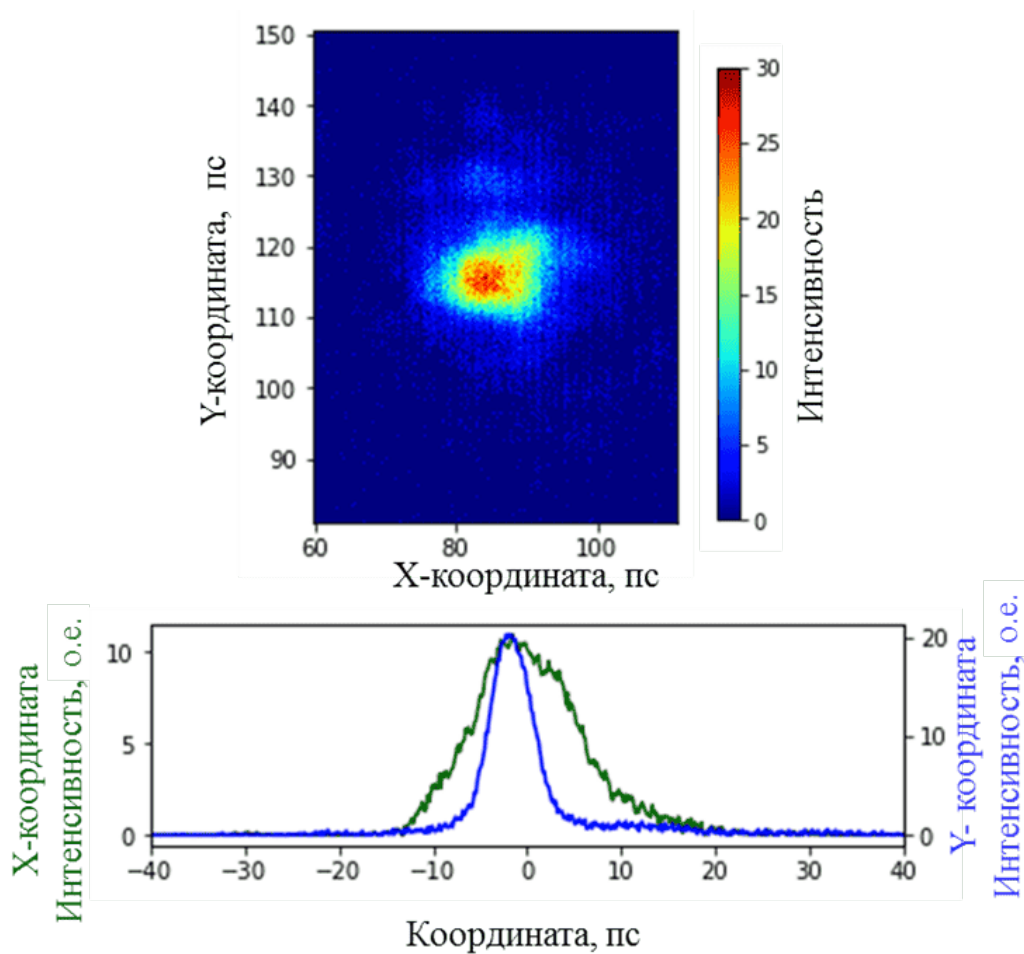


Рисунок 3.34 – Аппаратная функция и развернутое изображение одного сгустка. Видно, что достигнутое временное разрешение позволяет надежно определить длительность сгустка на уровне нескольких пикосекунд

При измерениях после ускоряющей структуры щель на фотокатоде стрик-камеры была заменена отверстием с целью оптимизировать временное разрешение (рисунок 3.35).

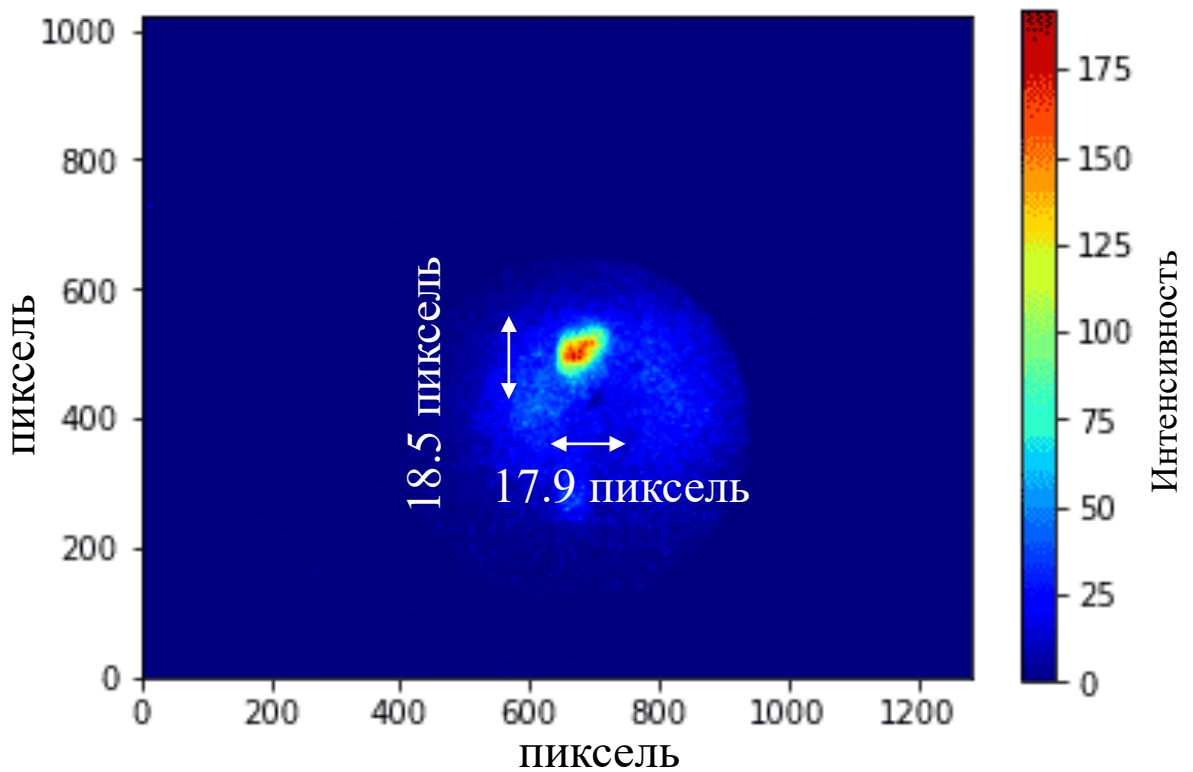


Рисунок 3.35 – Изображение пучка, записанные в режиме «фокус» стрик-камеры. Оптимизирована аппаратная функция черенковского детектора, ширина аппаратной функции равна 2,8 пс (FWHM)

Для проверки линейности стрик-камеры при зарегистрированном световом потоке его величина была ослаблена нейтральным светофильтром в 2,5 и 5 раз. Зарегистрированная длительность сгустка не изменилась, т.е. влиянием эффектов пространственного заряда фотоэлектронов при наших интенсивностях и длительностях сигнала можно пренебречь.

ГЛАВА 4. Прототип оптической системы диагностики бустера СКИФ

4.1 Проект системы оптической диагностики бустера СКИФ

Бустер СКИФ с максимальной энергией пучка $E_b = 3$ ГэВ является усовершенствованной версией синхротрона, разработанного в ИЯФ СО РАН для NSLS II [75], [76]. Бустер СКИФ будет оснащен оптической системой диагностики пучка для контроля за ним при инжекции, ускорении и выпуске в накопитель. Цикл инжекции/ускорения пучка в бустере имеет длительность несколько десятых долей секунды (рисунок 4.1).

Поперечный и продольный профиль пучка должен регистрироваться во время инжекции в бустер из линейного ускорителя и в процессе ускорения и выпуска пучка из бустера в канал бустер – накопитель. Основное предназначение диагностики – помогать оператору контролировать корректность всего процесса и выявлять отклонения, которые могут возникать в процессе работы бустера.

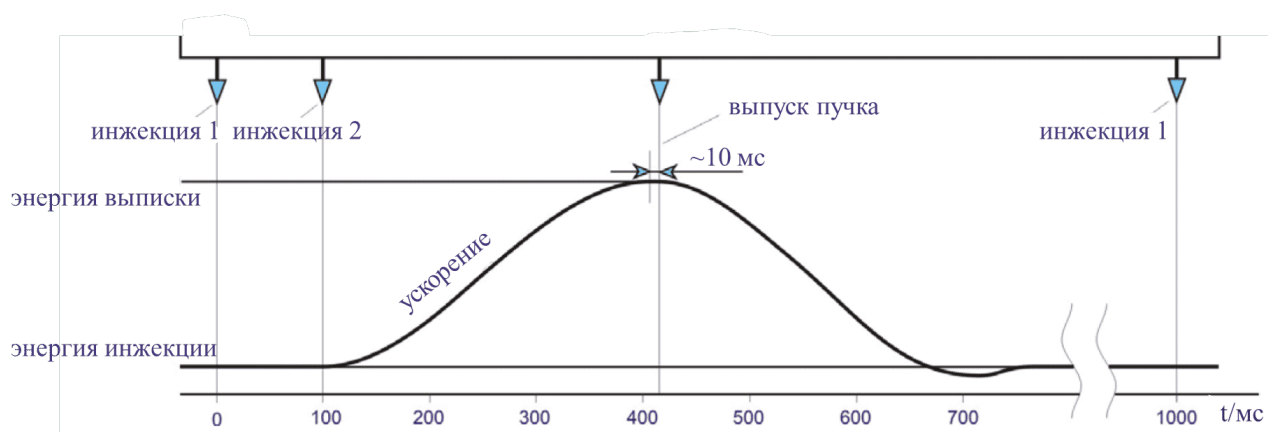


Рисунок 4.1 – Цикл работы бустера от инжекции до экстракции пучка

Для контроля правильности работы бустера полезна следующая информация:

- Положение на экране и форма пучка в моменты инжекции;
- Положение на экране и форма пучка перед экстракцией;

- Поведение формы и положения центра тяжести пучка в течение energy ramp.

За один рабочий цикл бустера оптическая диагностика должна произвести несколько измерений поперечного и продольного профиля ускоряемого пучка. До сих пор такой режим работы диагностики не использовался на ускорителях ИЯФ СО РАН, в связи с чем было принято решение отработать методику этих измерений на действующем ускорителе ВЭПП-3. Основные параметры ВЭПП-3 и бустера СКИФ приведены в таблице 4.1 и таблице 4.2 [77-79].

Таблица 4.1 – Параметры ВЭПП-3

Параметр	Количество
Частота обращения	4030 кГц
Периметр	74,39 м
Энергия	инжекция: 0,35 ГэВ выпуск :1,80 ГэВ эксперимент: 2,00 ГэВ
Размеры пучка ($\beta_x=\beta_y=5,5$ м, $D=1,2$ м) при $E_b = 350$ МэВ	радиальный бетатронный: 0,225 мм радиально-фазовый: 0,15 мм радиальный суммарный: 0,27 мм вертикальный (при 10% связи): 0,027 мм
Размеры пучка ($\beta_x=\beta_y=5,5$ м, $D=1,2$ м) при $E_b = 3000$ МэВ	радиальный бетатронный: 1,27 мм радиально-фазовый: 0,87 мм радиальный суммарный: 1,54 мм вертикальный (при 10% связи): 0,154 мм
Горизонтальный эмиттанс	0,009 мм·мрад (Частота ВЧ=8,06 МГц) 0,292 мм·мрад (Частота ВЧ=72,54 МГц)

Таблица 4.2 – Параметры бустера

Параметр	Количество	
Частота инжекция	1 Гц	
Частота ВЧ	357 МГц	
Периметр	158 м	
Энергия	впуск: 200 МэВ	выпуск: 3 ГэВ
Горизонтальный эмиттанс	0,166 нм·рад (Напряжение ВЧ=0,2 МВ)	37,4 нм·рад (Напряжение ВЧ=1,2 МВ)
Размеры пучка	Горизонтальный размер пучка 0,2 мм Вертикальный размер пучка 0,3 мм Длительность пучка 4,5 см (NSLS-II, $E_b = 3$ ГэВ)	

Для измерения профиля пучка на бустере СКИФ синхротронное излучение в оптическом диапазоне выводится из двух дипольных магнитов, и эти точки вывода отвечают требованиям максимального вертикального размера пучка и максимальной свободной длины вакуумной камеры между магнитами. Первая точка в диполе BR-A3L2 расположена в третьей арке бустера, а вторая в диполе BR-A1L1 близка к диагностическому прямому промежутку, его расположение на кольце показано на рисунке 4.2. Соответствующие структурные функции двух дипольных магнитов и размеры пучка в них перечислены в таблице 4.3.

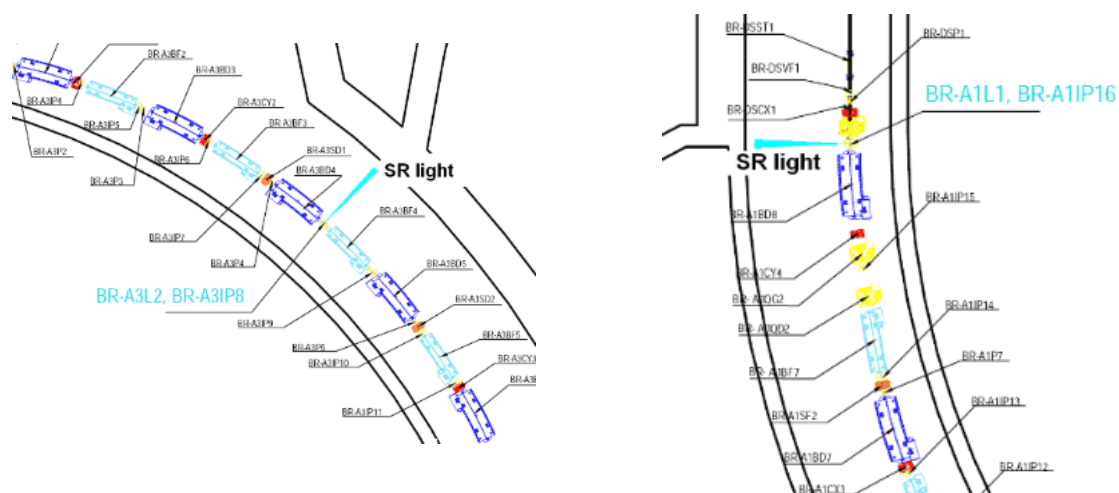


Рисунок 4.2 – Расположение мест вывода СИ из вакуумной камеры бустера

Таблица 4.3 – Вычисленные размеры пучка в точке излучения при энергии 3 ГэВ

Магнит	BR-A3BD4	BR-A1BD8
Размер пучка вертикального, σ_x / мм	0,26	0,27
Размер пучка горизонтального, σ_y / мм	0,1	0,2
Эмиттанс пучка, ε / нм	37,4	37,4
Горизонтальная β -функции, β_x / м	1,2	1,9
Вертикальная β -функции, β_y / м	6,8	25,7
Дисперсионная функция, η_x / м	0,18	0,07

Спектр синхротронного излучения при энергии $E_b = 3000$ МэВ, испускаемого пучком из двух поворотных магнитов, рассчитанный с помощью [80], показан на рисунке 4.3. Заштрихован диапазон энергий, соответствующий оптической области спектра (360-760 нм). Расчетные параметры СИ в этой точке представлены в таблице 4.4.

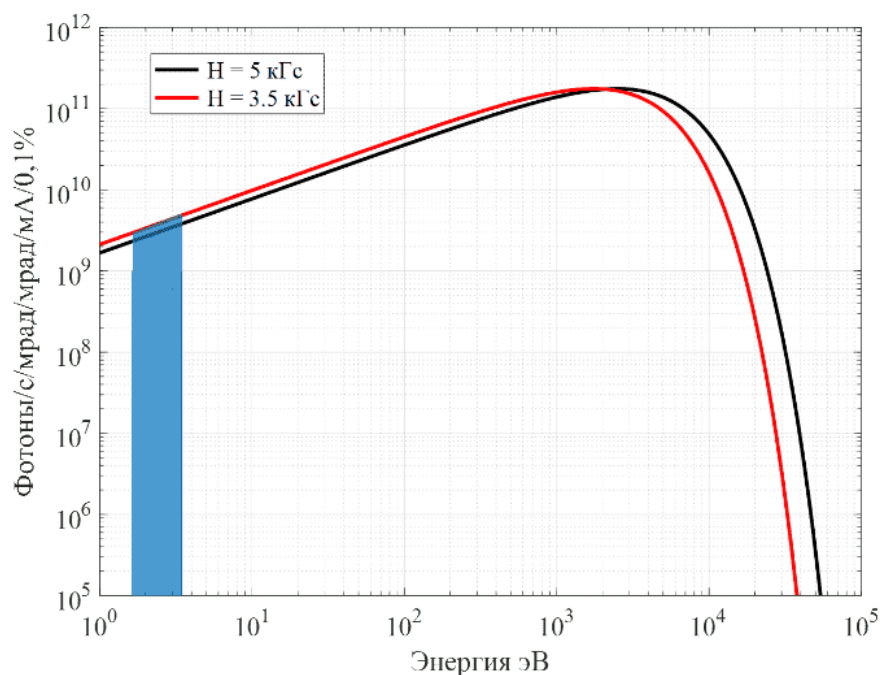


Рисунок 4.3 – Спектр СИ из дипольных магнитов. $B = 5$ кГс (красный) и $3,5$ (синий) для энергии пучка 3000 МэВ

Таблица 4.4 – Параметры пучка СИ в оптическом диапазоне в точке излучения при энергии бустера $E_b = 3$ ГэВ

Минимальная угловая расходимость	$1,7 \cdot 10^{-4}$ рад
Угловая расходимость СИ в видимом диапазоне	$2,38 \cdot 10^{-3}$ рад
Угол раствора СИ в горизонтальной плоскости	0,18 мрад

Спектр синхротронного излучения, создаваемого частицами с энергией 200 МэВ в поворотных магнитах, показан на рисунке 4.4. Количество фотонов в видимом диапазоне в зависимости от энергии пучка показано на рисунке 4.5.

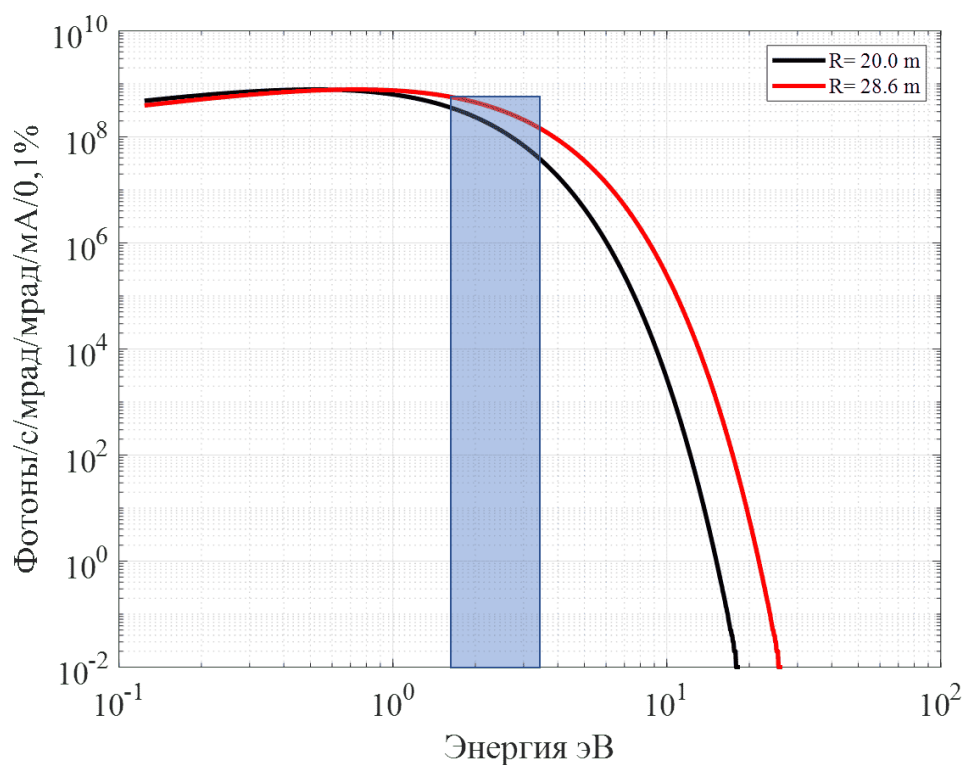


Рисунок 4.4 – Спектр СИ из дипольных магнитов для энергии пучка $E_b = 200$ МэВ

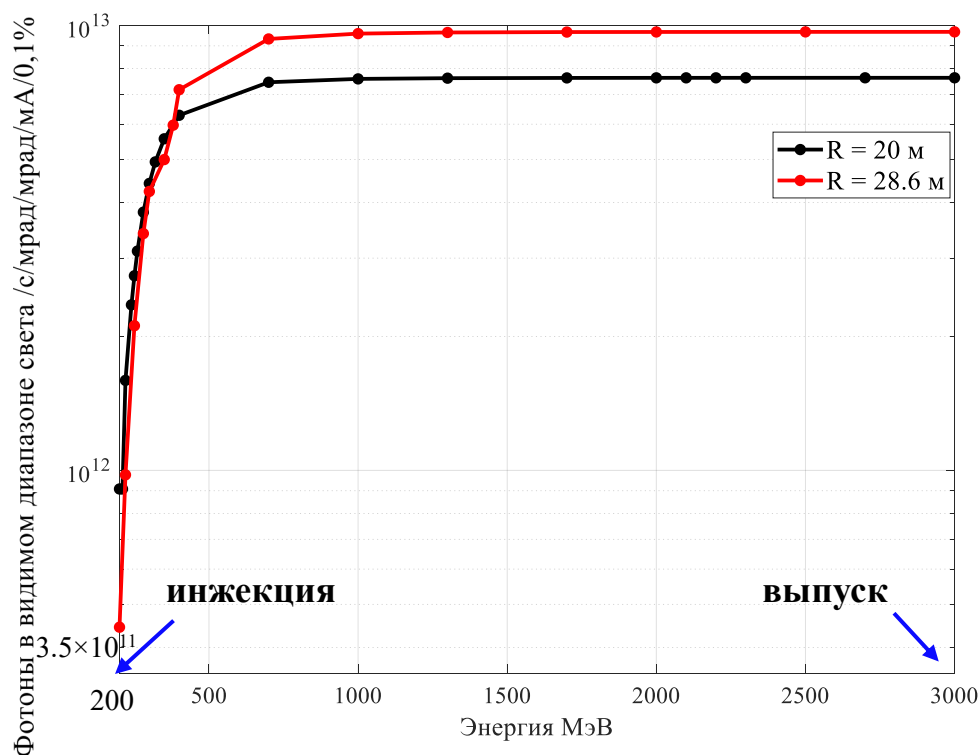


Рисунок 4.5 – Поток фотонов в видимом диапазоне из дипольных магнитов для разных энергий пучка

Одна точка вывода СИ будет использоваться для измерения продольных размеров пучка в бустере, в то время как другая – для измерения поперечного профиля. В настоящее время обе оптические системы спроектированы (рисунок 4.6, рисунок 4.7) и изготавливаются в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН.

Время затухания бетатронных колебаний при инжекции в ВЭПП-3 близко к длительности рабочего цикла бустера. Поэтому было принято решение отработать программное обеспечение и оптическую схему диагностики для бустера СКИФ на ускорителе ВЭПП-3. Действовавшая на ВЭПП-3 с 1986 г. оптическая система была заменена. Схема новой диагностики показана на рисунке 4.8. Установка в рабочем пространстве ВЭПП-3 показана на рисунке 4.9. Диагностики требовалось измерение продольного профиля пучка с относительной точностью не менее 5 %, измерение поперечных размеров пучки на каждом рабочем режиме и качественный контроль поведения поперечного профиля пучка во время инжекции.

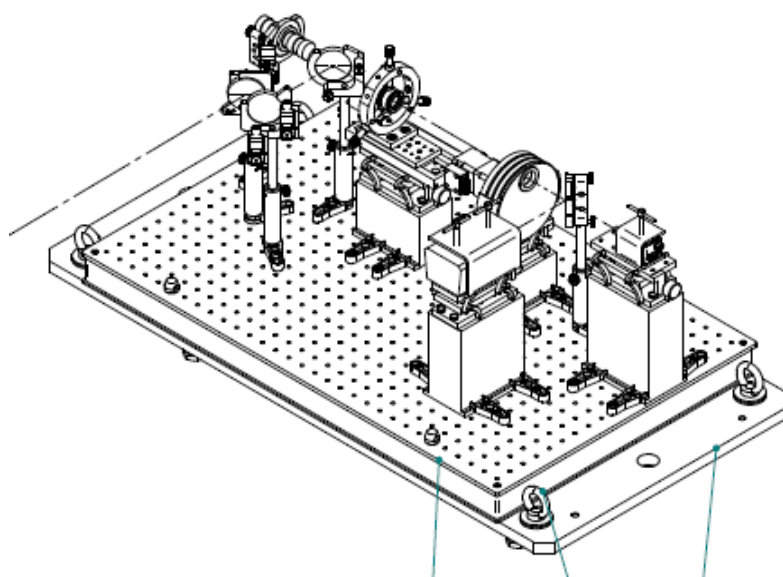


Рисунок 4.6 – Сборочный чертеж диагностики поперечного профиля пучка бустера СКИФ. На оптическом столе располагаются объектив, оптический аттенюатор, цифровая и аналоговая камеры

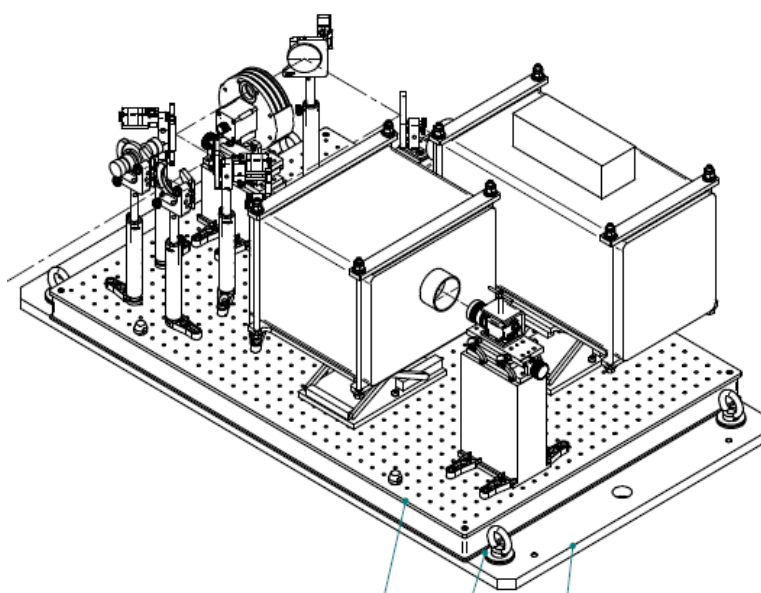


Рисунок 4.7 – Сборочный чертеж диагностики продольного профиля пучка бустера СКИФ. На оптическом столе располагаются стрик-камера и электронно-оптический диссектор

Оптическая часть спектра СИ при энергии инжекции в ВЭПП-3 $E_b = 450$ МэВ идентична спектру СИ из магнитов бустера СКИФ (рисунок 4.10). Параметры пучка в ВЭПП-3 приведены в таблице 4.5.

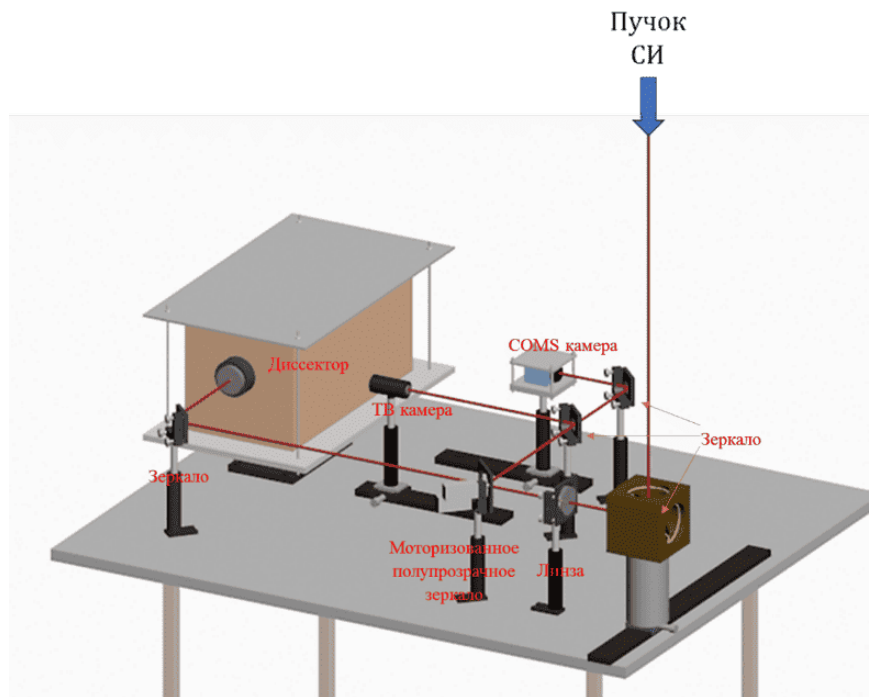


Рисунок 4.8 – Схема модифицированной оптической диагностики пучка ускорителя ВЭПП-3

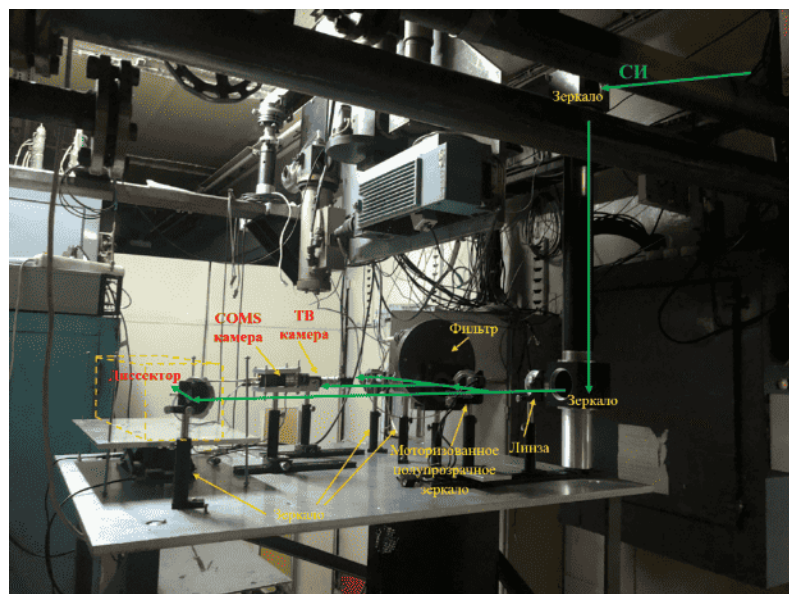


Рисунок 4.9 – Установка прототипа диагностической системы в рабочем пространстве ВЭПП-3. Диссектор снят

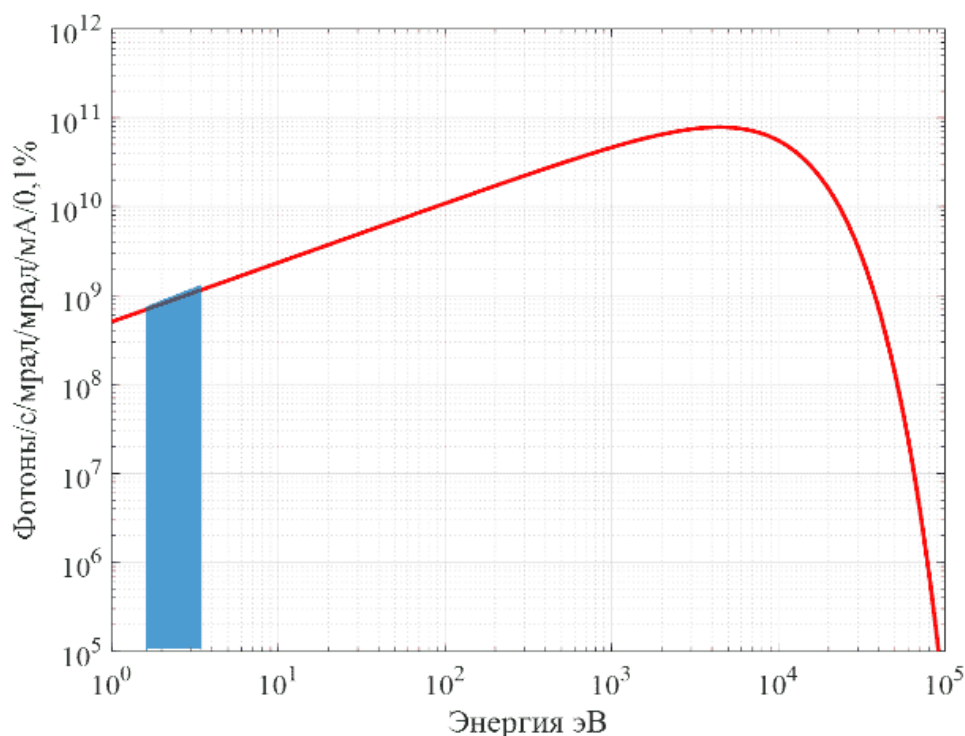


Рисунок 4.10 – Спектр СИ из дипольного магнита ВЭПП-3 для энергии пучка $E_b = 2000$ МэВ. Заштрихован диапазон энергий, соответствующий оптической области спектра

Таблица 4.5 – Вычисленные размеры пучка в ВЭПП-3 в точке излучения при энергии 2 ГэВ, $B = 2$ Т

СИ устройства	Оптическая функция в точке излучения, β_x, β_y, η_x /m	Размер источника в точке излучения, $\sigma_x \times \sigma_y$ /mm	Эмиттанс пучка, ϵ /nm rad
Сдвигатель длины волны	2; 4,5; 0,7	$0,9 \times 0,3$	~ 300

Оптическая часть спектра синхротронного излучения отражается от охлаждаемого медного зеркала и выходит из вакуумной камеры ВЭПП-3 через высоковакуумное оптическое окно. Оптическая схема диагностики показана на рисунке 4.11. Зеркало отражателя вводит оптическую ось в операционную платформу. Платформа имеет длину 800 мм и ширину 600 мм. Световой пучок фокусируется объективом и разделяется на два потока на моторизованном полупрозрачном зеркале, одна часть поступает в электронно-оптический диссектор для

измерения продольного размера пучка, а другая – фокусируется на ТВ-камеру и цифровую CMOS камеру для регистрации поперечного профиля пучка.

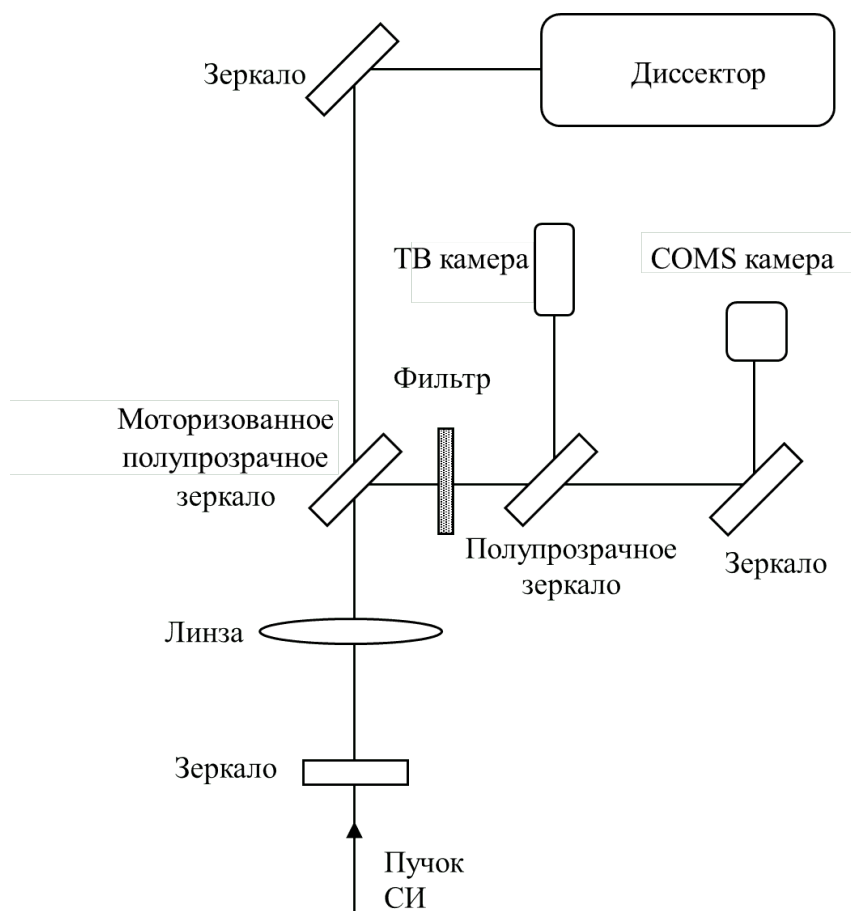


Рисунок 4.11 – Оптическая схема измерения продольного и поперечных размеров пучка

Для измерения продольного профиля пучка используется электронно-оптический диссектор [81-87] (рисунок 4.12), работающий на частоте ВЧ ВЭПП-3 (72 МГц).

Диссекторы используются для регистрации продольного профиля пучка на всех циклических ускорителях ИЯФ СО РАН. Временное разрешение, полученное в эксперименте с использованием диссектора в [88], составляет $\tau_{af} = 3,8 \pm 0,4$ пс, поэтому его можно применять для измерения продольного размера пучка на СКИФе.

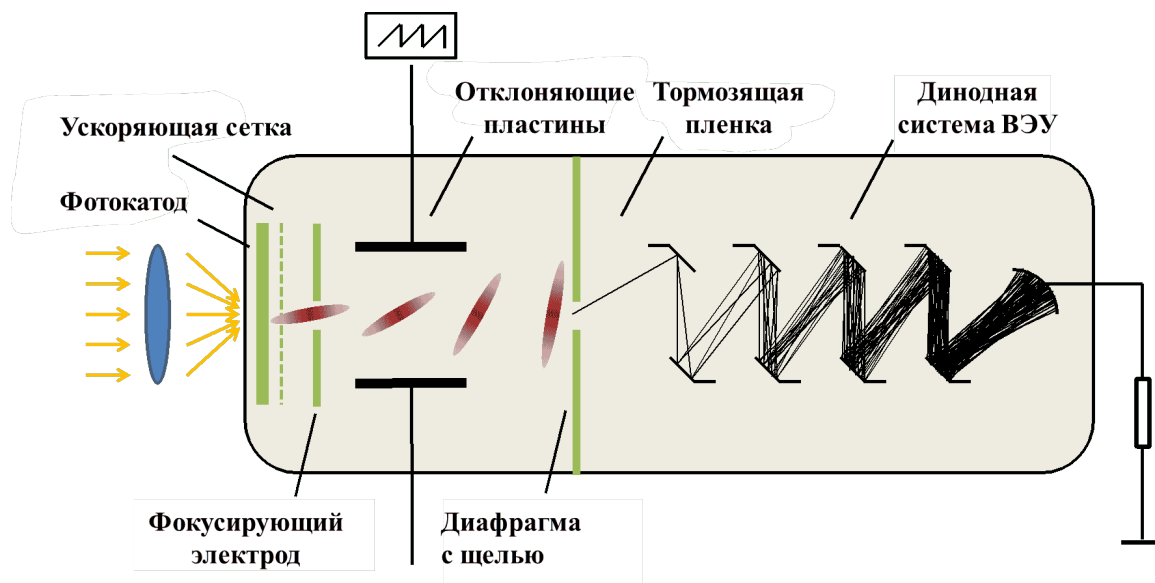


Рисунок 4.12 – Упрощенная схема устройства диссектора

4.2 Разработка программного обеспечения для измерения пучка

ТВ-камера используется как качественного контроля за поведением и формой поперечного профиля пучка.

Для измерения поперечных размеров пучка применена цифровая камера Daheng MER-131-75GM (См. раздел 2.2.3.), оснащенная CMOS-датчиком Onsemi PYTHON 1300 [61].

Разработан комплект программного обеспечения на основе Python для Daheng MER-131-75GM, интерфейс которого показан на рисунке 4.13. Основные функции включают в себя отображение изображений пучка, подгонку и расчет поперечных профилей, а также запись FWHM и центр массы во времени. Программа оснащена двумя режимами записи: непрерывный сбор данных и сбор данных по внешнему триггеру, настройки можно регулировать с помощью кнопок [10].

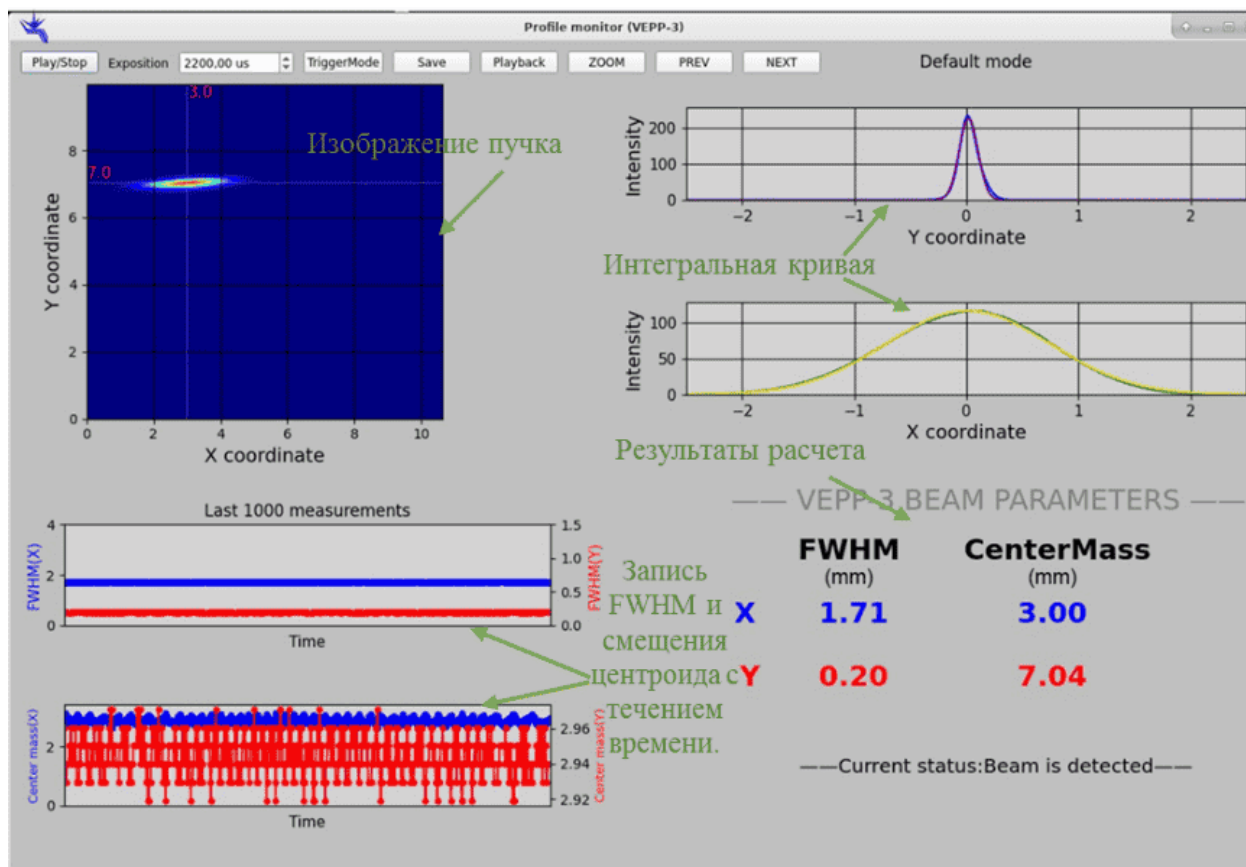


Рисунок 4.13 – Интерфейс программы, основанный на Python PyQt5. Каждая функция отмечена на рисунке красным цветом

Предполагается, что на ВЭПП-3 будет полностью отработано программное обеспечение, позволяющее оператору бустера СКИФ контролировать поведение размеров пучка в рабочем цикле установки. Действующая в настоящее время версия является лишь первым приближением к желаемому результату. Требования к окончательной версии программы, выглядят следующим образом:

- Отображение положения и формы пучка в моменты инжекции;
- Отображение положения и формы пучка перед экстракцией;
- Поведение формы и положения центра тяжести пучка в течение energy ramp.

Вместе с тем, оператор просто не сможет детально анализировать процесс, происходящий с частотой 1 Гц, поэтому необходимо записывать все эти данные при каждом цикле инжекция-экстракция, чтобы иметь возможность для их анализа в спокойной обстановке в случае необходимости. Например, чтобы опреде-

лить, в какой момент energy ramp положение либо форма пучка стали отклоняться от оптимальных.

Для контроля за стабильностью цикла injection – extraction можно постоянно выводить на экран только два изображения поперечного профиля пучка – в момент инжекции и в момент выпуска.

«Фильм» о всем цикле следует записывать по запросу оператора. При максимальной частоте кадров 40 Гц за время цикла будет записано около 20 кадров. Эти кадры нужно архивировать в формате bmp и выводить на экран по запросу оператора. При записи «фильма» профиль пучка на экран не выводится и фитирование не производится. Это делается только при просмотре записанных кадров.

«Фильмы» записываются последовательно, один за другим, до нажатия кнопки Save. При нажатии этой клавиши запись прекращается при окончании текущего цикла бустера. После этого оператор получает возможность выбора и просмотра записанных «фильмов» после нажатия кнопки Playback. При просмотре «фильма» записанные кадры можно выводить либо по одиночке, стирая предыдущее изображение, либо суммируя выводимые изображения. В таком случае при фитировании определяется центр тяжести получающейся фигуры и ее ширина на полувысоте. Эти данные отображаются в соответствующих окнах.

Изображения пучка, записываемые при injection – extraction, также должны архивироваться при нажатии клавиши Save. Профили injection – extraction нужно всегда фитировать с частотой работы бустера и определять положение центра тяжести пучка. Графики этих величин нужно выводить на экран в отдельном окне и всегда сохранять эти данные в базе данных. Время экспозиции одиночного кадра выбирается оператором, но программа должна вводить ограничения при записи «фильма», определяемые частотой кадров. Переход к просмотру записанных кадров происходит при нажатии клавиши Profiles play.

Эти требования были включены в техническое требование для компании COSY (Словения), с которой заключен контракт на написание программного обеспечения для систем диагностики на СКИФ.

4.3 Результаты экспериментов на ВЭПП-3

Динамика пучка при инжекции в ВЭПП-3 регистрировалась с помощью цифровой-камеры, показана на рисунке. 4.14. Было записано 2400 кадров в течение 3 секунд, т.е. с частотой 800 Гц, для регистрации изменения поперечного размера пучка во времени. Динамика размеров пучка четко различима, поэтому данная диагностическая система вполне соответствует требованиям аналогичных измерений в бустере СКИФ. Время экспозиции камеры может быть подобрано так, чтобы избежать насыщения сигнала, заметного на рисунке 4.14.

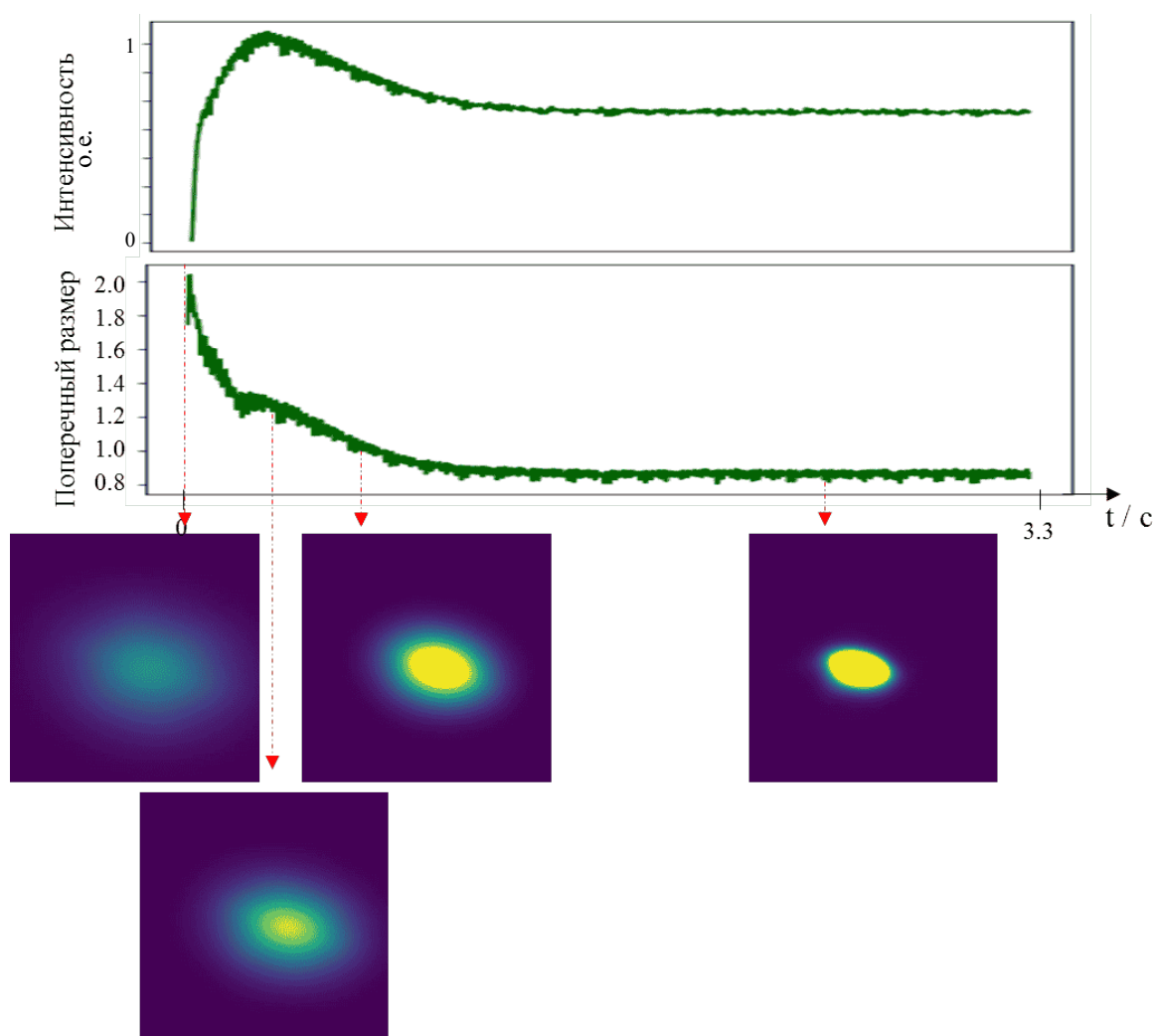


Рисунок 4.14 – Динамика поперечного размера пучка во время инжекции в ВЭПП-3

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. 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.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю профессору Мешкову О.И. за предложенную тему диссертации, поддержку и советы при ее реализации. Автор выражает благодарность за консультации и дружескую помощь сотрудникам сектора 1-31 В. М. Борину, В. Л. Дорохову, Ю. И. Мальцевой, Д. Ф. Решетову, А. А. Сяткину. Автор глубоко признателен В. Г. Ческидову за создание конструкций диагностических устройств, рассмотренных в диссертации. Автор признателен работникам экспериментального производства ИЯФ

СО РАН, чье профессиональное мастерство способствовало успешному воплощению в жизнь идей, развитых в диссертации.

Список сокращений и условных обозначений

- ILC — International Linear Collider, Международный линейный коллайдер
— проект международного линейного коллайдера
- CLIC — Compact Linear Collider, Компактный линейный коллайдер, CERN
- Euro-XFEL — European X-Ray Free-Electron Laser Facility, Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах
- LCLS — Linac Coherent Light Source, Источник когерентного света линейного ускорителя, Стэнфордский университет, США.
- СКИФ — Сибирский кольцевой источник фотонов, Новосибирская область, Россия
- ЦФ — Цилиндр Фарадея
- ИЯФ СО РАН — Институт ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН
- ВЭПП-3 — электрон-позитронный накопитель-3 ИЯФ СО РАН
- FLUKA — FLUktuierende KAskade, Particle Transport Code
- СИ — Синхротронное излучение
- ESRF — European Synchrotron Radiation Facility, исследовательский ускорительный комплекс, источник синхротронного излучения четвертого поколения, расположенный в Гренобле, Франция
- DBA — Double Bend Achromat, ахромат с двойным изгибом
- TBA — Triple Bend Achromat, ахромат с тройным изгибом
- MBA — Multi Bend Achromat, ахромат с многократным изгибом
- APS-U — Advanced Photon Source Upgrade, источник синхротронного излучения третьего поколения в Аргоннской национальной лаборатории, в 40 км от Чикаго, США
- ALS-U — Advanced Light Source Upgrade, источник синхротронного излучения третьего поколения в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли, США

DESY	— The Deutsches Elektronen-Synchrotron, исследовательский центр по физике частиц, в Гамбурге и Цойтене
PETRA-IV	— The Positron-Electron Tandem Ring Accelerator, Позитронно-электронный тандемный кольцевой ускоритель DESY в Гамбурге, Германия
FLASH	— X-ray Free-electron laser DESY
LYSO:Ce	— Cerium doped Lutetium Yttrium Silicate scintillation crystal
LBTL	— Линию передачи линейный ускоритель-бустер СКИФ
BSTL	— Линию передачи бустера-накопителя СКИФ
FCT	— Быстродействующий трансформатор тока
BPM	— Мониторы положения пучка
ASTRA	— A Space Charge Tracking Algorith, DESY
NLSLS II	— National Synchrotron Light Source — ускорительный комплекс, источник синхротронного излучения в Брукхейвенской национальной лаборатории, США
ELEGANT	— ELEctron Generation ANd Tracking
FWHM	— Full width at half maximum, полуширина
m_e	— Масса электрона, 0,511 МэВ
ξ	— Безразмерный коэффициент
ρ	— Плотность среды
Z	— Атомный номер среды
A	— Атомная масса среды
E	— Энергия налетающей заряженной частицы
E_k	— Кинетическая энергия
I	— Ток
I_b	— Ток пучка
β	— Безразмерная скоростью $\beta = v/c$
E_b	— Энергия пучка
E_{cr}	— Энергетический порог
B	— Напряженность магнитного поля

C	— Емкость
U_c	— Напряжение
τ	— Постоянная времени $\tau = RC$
R	— Сопротивление
D	— Относительное отверстие
x	— Толщина среды в направлении продвижения частиц
c	— Скорость света
n	— Показатель преломления среда
α	— Постоянная тонкой структуры
q	— Заряд электрона
λ	— Длина волны черенковского излучения.
N_{ph}	— Число фотонов
θ	— Угол черенковского излучения
Δt	— Разница во времени
σ_x, σ_y	— Поперечный размер пучка
β_x, β_y	— Структурные функции
B_m	— Матрица фазовых эллиптических коэффициентов пучка
B_{11}	— Квадрат поперечного размера σ пучка
B_0	— Матрица пучка
R_m	— Матрица перехода
Q_m	— Матрица тонких линз
K	— Величина, обратная фокусному расстоянию
ε	— Эмиттанс пучка
σ_E	— Энергетический разброс пучка
H	— Напряженность магнитного поля
f	— Частота
ΔE	— Энергетический разброс (FWHM)
U_m	— Напряжение модулятора

- τ_{af} — Временное разрешение (аппаратная функция)
- τ_b — Длительность сгустка
- τ_0 — Ширина на полувывоте FWHM исходного изображения сгустка

Список литературы

- [1]. Shin S. New era of synchrotron radiation: fourth-generation storage ring / S. Shin. – Текст : электронный // AAPPS Bulletin. – 2021. – Vol. 31. – № 1. – P. 21. – URL: <https://doi.org/10.1007/s43673-021-00021-4> – Дата публикации: 11.07.2021.
- [2]. Winick H. Fourth generation light sources / H. Winick. – Текст : электронный // Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (Cat. No.97CH36167). – IEEE, 1998. – Vol. 1. – P. 37-41. – URL: <https://doi.org/10.1109/PAC.1997.749539> – Дата публикации: 01.03.1997.
- [3]. 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- T04023. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/04/T04001> – Дата публикации: 01.04.2022.
- [4]. 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.
- [5]. 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.
- [6]. 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, Brazi : JACoW, 2021. – P. 1016-1019. – URL: <http://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB328> – Дата публикации: 21.03.2021.
- [7]. Beam Loss Diagnostics System for SKIF Synchrotron Light Source / X. C. Ma, Y. I. Maltseva, O. I. Meshkov [et al.]. – Текст : электронный // IPAC 2021 - Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. – Campinas, SP, Brazi : JACoW, 2021. – P. 1012-1015. – URL: <http://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB327> – Дата публикации: 26.03.2021.

- [8]. 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.
- [9]. 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. : сайт. – URL: <https://fips.ru/EGD/76757fd4-baea-400c-b55b-7df6da012319>– Текст :электронный.
- [10]. Results of manufacturing and operation of the first accelerating structures for the linear accelerator of the SKIF injector based on a disk-loaded waveguide / A. Levichev, K. Grishina, S. Samoilov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2023. – Vol. 18. – № 07. – P. T07001-T07011. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001> – Дата публикации: 03.07.2023.
- [11]. Radiation from electrons in a synchrotron / F. R. Elder, A. M. Gurewitsch, R. V. Langmuir, H. C. Pollock. – Текст : электронный // Physical Review. – 1947. – Vol. 71. – № 11. – P. 829-830. – URL: doi.org/10.1103/PhysRev.71.829.5 – Дата публикации: 15.03.1948.
- [12]. Sokolov A. A. Synchrotron radiation / A. A. Sokolov, I. M. Ternov. – Текст : электронный // Soviet Physics Journal. – 1967. – Vol. 10. – № 10. – P. 39-47. – URL: <https://doi.org/10.1007/BF00820300> – Дата публикации: 01.10.1967.
- [13]. Список источников света : сайт. – URL: <https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [14]. Superconducting elliptical undulator / P. Kanonik, S. Shruschev, N. Mezentsev [et al.]. – Текст : электронный // AIP Conference Proceedings. – Coimbatore, India : AIP Publishing, 2020. – Vol. 2299. – P. 020013. – URL: doi.org/10.1063/5.0034755 – Дата публикации: 17.11.2020.
- [15]. Jeff A. OFF-AXIS undulator radiation for CLIC drive beam diagnostics / A. Jeff, T. Lefèvre, C. P. Welsch. – Текст : электронный // IBIC 2013: Proceedings of the 2nd International Beam Instrumentation Conference. – Oxford, UK : JACoW, 2013. – P. 228-231. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2013/papers/mopf10.pdf> – Дата публикации: 01.09.2013.
- [16]. European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) : сайт. – URL: <https://www.esrf.fr> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.

- [17]. SPring-8 synchrotron radiation facility : сайт. – URL: <http://www.spring8.or.jp/en/> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст :электронный.
- [18]. Emery L. Top-up operation experience at the advanced photon source / L. Emery, M. Borland. – Текст : электронный // Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference. – New York, NY, USA : IEEE, 1999. – Vol. 1. – P. 200-202. – URL: <http://doi.org/10.1109/PAC.1999.795663> – Дата публикации: 02.04.1999.
- [19]. Superconducting Wave Length Shifters and Multipole Wigglers Developed in Budker Inp / A. M. Batrakov, E. A. Bekhtenev, V. M. Borovikov [et al.]. – Текст : электронный. – Beijing, China : JACoW, 2001. – P. 251-253. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/a01/PDF/TUAM04.pdf> – Дата публикации: 17.09.2001.
- [20]. Clarke J. Insertion Devices Lecture 2 Wigglers and Undulators [J].
- [21]. Design of double-bend and multibend achromat lattices with large dynamic aperture and approximate invariants / Y. Li, K. Hwang, C. Mitchell [et al.]. – Текст : электронный // Physical Review Accelerators and Beams. – 2021. – Vol. 24. – № 12. – P. 124001. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.124001> – Дата публикации: 27.12.2021.
- [22]. MAX IV Laboratory (Swedish national laboratory) : сайт. – URL: <https://www.maxiv.lu.se/> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст :электронный.
- [23]. A new 5BA low emittance lattice for sirius / L. Liu, N. Milas, A. H. C. Mukai [et al.]. – Text : electronic // IPAC 2013: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference. – Shanghai, China : JACoW, 2013. – P. 1874-1876. – URL: <https://inspirehep.net/files/e4b7243698b00ebdb4c6b8c6036df3> (date accessed: 12.05.2013).
- [24]. ESRF-EBS: The Extremely Brilliant Source Project : сайт. – URL: <https://indico.psi.ch/event/5589/> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [25]. APS Upgrade introduction : сайт. – URL: <https://www.aps.anl.gov/APS-Upgrade> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [26]. Physics design progress towards a diffraction limited upgrade of the ALS / C. Steier, J. Byrd, H. Nishimura [et al.]. – Текст : электронный // IPAC 2016 - Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference. – Busan, Korea : JACoW, 2016. – P. 2956-2958. – URL: <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-WEPOW049> – Дата публикации: 08.03.2016.
- [27]. PETRA IV: the ultralow-emittance source project at DESY / C. G. Schroer, I. Agarov, W. Brefeld [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Synchrotron Ra-

- diation. – 2018. – Vol. 25. – № 5. – P. 1277-1290. – URL: <https://doi.org/10.1107/S1600577518008858> – Дата публикации: 16.06.2018.
- [28]. Stillman A. Laser Compton polarimetry of proton beams / A. Stillman. – Текст : электронный // Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference. – Dallas, USA, : IEEE, 1995. – Vol. 4. – P. 2560-2562. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/505617/> – Дата публикации: 01.05.1995.
- [29]. Методы оптической диагностики электрон-позитронных пучков и взаимодействия плазмы с сильноточным электронным пучком / О. Мешков [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2012. — Февр. — Т. 43. — С. 451—499. — URL: http://www1.jinr.ru/Репан/2012-v43/v-43-2/04_vyach.pdf.
- [30]. Методы неразрушающей диагностики пучков заряженных частиц в ускорителях / П. Логачёв [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2016. — Т. 47, № 2. — URL: https://www1.jinr.ru/publish/Репан/v-47-2/v-47-2_04_Logachev.pdf
- [31]. Koziol H. Beam diagnostics for accelerators / H. Koziol. – Текст : электронный // CAS - CERN Accelerator School : Basic Course on General Accelerator Physics. – 2000. – P. 1-44. – URL: <http://cds.cern.ch/record/499098/files/p154.pdf> – Дата публикации: 02.10.2000.
- [32]. Real - Time Magnetic Electron Spectrometer for Use with Medical Accelerators . / P. E. Maggi, K. L. M. Ii, R. L. Carver, K. R. Hogstrom. – Текст : электронный // North American Particle Accelerator Conference (3rd). – Chicago, Illinois, USA : JACoW, . – P. 3. – URL: <http://doi.org/10.18429/JACoW-NAPAC2016-TUPOA38> – Дата публикации: 11.10.2016.
- [33]. Design of a double dipole electron spectrometer / A. Maitrallain, B. van der Geer, M. de Loos [et al.]. – Текст : электронный // Laser Acceleration of Electrons, Protons, and Ions V / eds. E. Esarey [et al.]. – SPIE, 2019. – P. 37. – URL: <https://doi.org/10.1117/12.2522782> – Дата публикации: 24.04.2019.
- [34]. Scintillating screen monitors for transverse electron beam profile diagnostics at the European XFEL / C. Wiebers, M. Holz, G. Kube [et al.]. – Текст : электронный // IBIC 2013: Proceedings of the 2nd International Beam Instrumentation Conference. – Oxford, UK : JACoW, 2013. – P. 807-810. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2013/papers/wepf03.pdf> – Дата публикации: 16.09.2013.
- [35]. Transverse beam profile imaging of few-micrometer beam sizes based on a scintillator screen / G. Kube, S. Bajt, A. P. Potylitsyn [et al.]. – Текст : электронный // IBIC 2015: Proceedings of the 4th International Beam Instrumentation Conference. – Melbourne, Australia : JACoW, 2015. – P. 330-334. – URL: <https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2015-TUPB012> – Дата публикации: 15.09.2015.

- [36]. Lumpkin A. H. High-resolution longitudinal profile diagnostics for ultralow charges stored in a ring / A. H. Lumpkin, K. P. Wootton. – Текст : электронный // *Physical Review Accelerators and Beams*. – 2021. – Vol. 24. – № 7. – P. 072806. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.072806> – Дата публикации: 30.07.2021.
- [37]. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 / P. A. Piminov, G. N. Baranov, A. V. Bogomyagkov [et al.]. – Текст : электронный // *Physics Procedia*. – 2016. – Vol. 84. – P. 19-26. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005> – Дата публикации: 12.12.2016.
- [38]. Применение коронографа для исследования поперечного распределения плотности электронного пучка в накопителе ВЭПП-3 // *Budker Institute of Nuclear Physics* : сайт. – URL: https://www.inp.nsk.su/images/preprint/2004_033.pdf (дата обращения: 10.04.2023)
- [39]. A new station for optical observation of electron beam parameters at electron storage ring SIBERIA-2 / O. Meshkov, A. Stirin, G. Kovachev [et al.]. – Текст : электронный // *Journal of Instrumentation*. – 2016. – Vol. 11. – № 12. – URL: <http://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/P12015> – Дата публикации: 01.12.2016.
- [40]. Spectrum of coherent synchrotron radiation in the far-infrared region / K. Ishi, Y. Shibata, T. Takahashi [et al.]. – Текст : электронный // *Physical Review A*. – 1991. – Vol. 43. – № 10. – P. 5597-5604. – URL: doi.org/10.1103/PhysRevA.43.5597 – Дата публикации: 13.11.1990.
- [41]. Diagnostics of an electron beam of a linear accelerator using coherent transition radiation / Y. Shibata, T. Takahashi, T. Kanai [et al.]. – Текст : электронный // *Physical Review E*. – 1994. – Vol. 50. – № 2. – P. 1479-1484. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.1479> – Дата публикации: 01.08.1994.
- [42]. Electron Beam Diagnostics using Coherent Cherenkov Radiation in Aerogel / R. Tikhoplav, A. Knyazik, J. B. Rosenzweig [et al.]. – Текст : электронный // *AIP Conference Proceedings*. – AIP, 2009. – Vol. 1086. – P. 610-615. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.3080977> – Дата публикации: 26.01.2009.
- [43]. Observation of coherent diffraction radiation from bunched electrons passing through a circular aperture in the millimeter- and submillimeter-wavelength regions / Y. Shibata, S. Hasebe, K. Ishi [et al.]. – Текст : электронный // *Physical Review E*. – 1995. – Vol. 52. – № 6. – P. 6787-6794. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.52.6787> – Дата публикации: 19.06.1995.
- [44]. Bunch Length Measurement Employing Cherenkov Radiation from a Thin Silica Aerogel / K. Nanbu, Y. Saito, H. Saito [et al.]. – Текст : электронный // *Particles*. – 2018. – Vol. 1. – № 1. – P. 305-314. – URL: <http://doi.org/10.3390/particles1010025> – Дата публикации: 11.12.2018.

- [45]. Detailed characterization of electron sources yielding first demonstration of European x-ray free-electron laser beam quality / F. Stephan, C. H. Boulware, M. Krasilnikov [et al.]. – Текст : электронный // *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*. – 2010. – Vol. 13. – № 2. – P. 020704. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.13.020704> – Дата публикации: 23.02.2010.
- [46]. Status of the Novosibirsk fourth-generation light source SKIF : сайт. – URL: https://epaper.kek.jp/rupac2021/talks/moy04_talk.pdf (дата обращения: 10.04.2023)
- [47]. Analysis of Regular Accelerating Structures of a Linear Accelerator for the Injector of Siberian Photon Ring Source / K. A. Grishina, A. V. Andrianov, M. V. Arsentyeva [et al.]. – Текст : электронный // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2020. – Vol. 17. – № 1. – P. 65-72. – URL: <http://doi.org/10.1134/S1547477120010082> – Дата публикации: 27.02.2020.
- [48]. Injection System for the Siberian Ring Source of Photons / S. M. Gurov, V. N. Volkov, K. V. Zolotarev, A. E. Levichev. – Текст : электронный // *Journal of Surface Investigation*. – 2020. – Vol. 14. – № 4. – P. 651-654. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1027451020030271> – Дата публикации: 25.07.2020.
- [49]. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk / G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov [et al.]. – Текст : электронный // *Physical Review Accelerators and Beams*. – 2021. – Vol. 24. – № 12. – P. 120704. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704> – Дата публикации: 20.12.2021.
- [50]. Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector / A. Andrianov, M. Arsentyeva, A. Barnyakov [et al.]. – Текст : электронный // *Journal of Instrumentation*. – 2022. – Vol. 17. – № 02. – P. T02009. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/T02009> – Дата публикации: 01.02.2022.
- [51]. Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / Под ред. чл.-корр. РАН Н.С.Диканского. — Новосибирск : Параллель, 2009. — с. 294. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/236875689>.
- [52]. Methods of optical diagnostics of electron-positron beams and interaction between plasma and high-current electron beam / L. N. Vyacheslavov, M. V. Ivantsivskii, O. I. Meshkov [et al.]. – Текст : электронный // *Physics of Particles and Nuclei*. – 2012. – Vol. 43. – № 2. – P. 231-261. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063779612020074> – Дата публикации: 27.03.2012.
- [53]. The Phosphor Screen of the Image Intensifier : сайт. – URL: <https://stanfordcomputeroptics.com/technology/image-intensifier/phosphor-screen.html> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.

- [54]. Phosphor Screens : сайт. – URL: <https://www.proxivision.de/datasheets/Phosphor-Screen-PR-0056E-03.pdf> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [55]. Phosphors - Lambert Instruments : сайт. – URL: <https://www.lambertinstruments.com/phosphors> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [56]. Phosphor Screens : сайт. – URL: <http://www.hep.ph.ic.ac.uk/fets/pepperpot/ccdcam/eph.pdf> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [57]. Воронкин, Е. Ф. Цифровая рентгенография с применением композитных экранов для неразрушающего контроля в промышленности и медицине / Е. Ф. Воронкин, Р. О. Пастовенский // Техническая диагностика и неразрушающий контроль : электронный журнал. – URL: <https://patonpublishinghouse.com/tdnk/pdf/2017/pdfarticles/03/7.pdf>. – Дата публикации: 06.03.2017. – ISSN 0235-3474
- [58]. P43 for manufacturing of large area scintillating screens / V. Balakin, O. Meshkov, V. Ulianitsky [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17. – № 8. – P. P08020. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/08/P08020> – Дата публикации: 01.08.2022.
- [59]. Chromox Fluorescent Screens : сайт. – URL: <https://www.advatech-uk.co.uk/chromox.html> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [60]. Linear Bellows Drive : сайт. – URL: https://www.lesker.com/newweb/sample_manipulation/linearbellowsdrive.cfm (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [61]. Daheng camera MER-131-75GM-P : сайт. – URL: <https://daheng-imaging.com/show-105-2460-1.html> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [62]. Preparation for nsls II linac to booster transport line commissioning / G. M. Wang, M. Davidsaver, R. Fliller [et al.]. – Текст : электронный // IPAC 2012 - International Particle Accelerator Conference 2012. – New Orleans, USA : JACOW, 2012. – P. 1002-1004. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2012/papers/moppr094.pdf> – Дата публикации: 02.05.2012.
- [63]. Burge E. J. Theoretical study of slit scattering / E. J. Burge, D. A. Smith. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 1962. – Vol. 33. – № 12. – P. 1371-1377. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.1717782> – Дата публикации: 17.08.1962.
- [64]. Analytical expressions of transfer functions for a hard edge dipole magnet using a basic geometrical approach / A. Sharma, P. Singh, Abdurrahim [et al.]. – Текст : электронный // Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. – 2013.

- Vol. 16. – № 1. – P. 014001. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.16.014001> – Дата публикации: 08.01.2013.
- [65]. FLUKA: A Multi-Particle Transport Code. Vol. 773 / A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, J. Ranft. – Menlo Park, CA, 2005.
- [66]. User's Manual for elegant : сайт. – URL: https://ops.aps.anl.gov/manuals/elegant_latest/elegant.html (дата обращения: 10.04.2023)
- [67]. Cherenkova E. P. The discovery of the Cherenkov radiation / E. P. Cherenkova. – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2008. – Vol. 595. – № 1. – P. 8-11. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.07.006> – Дата публикации: 05.07.2008.
- [68]. P. A. Cherenkov, Dok. Akad. Nauk SSSR 2, 451 (1934) Cherenkov P. A. Visible luminescence of pure liquids under the influence of γ -radiation / P. A. Cherenkov. – Текст: электронный // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. – 1967. – Vol. 93. – № 10. – P. 385-388. – URL: <http://ufn.ru/ru/articles/1967/10/n/> – Дата публикации: 05.10.1967.
- [69]. Design of the bunch length measurement for the photo injector test facility at DESY Zeuthen / Q. Zhao, J. Bähr, I. Bohnet [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference. – IEEE, 2001. – Vol. 3. – P. 2299-2301. – URL: <http://doi.org/10.1109/pac.2001.987358> – Дата публикации: 18.08.2001.
- [70]. Использование пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 для диагностики многоканальных лазерных установок / С. Г. Гаранин [и др.] // Квантовая электроника. — 2014. — Т. 44, № 8. — С. 798—800. — URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/qe/v44/i8/p798>.
- [71]. ГОСТ Р 53734.2.2-2012 Электростатика. Часть 2.2. Методы испытаний. Способность материалов накапливать электростатические заряды : дата введения 2012-12-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
- [72]. Разработка структуры резонаторов W-диапазона : специальность 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника : диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук /. Арсентьева, М.В – Новосибирск, 2022. – 100 с.
- [73]. Astra: A Space Charge Tracking Algorithm : сайт. – URL: <https://www.desy.de/~mpyflo/> (дата обращения: 10.04.2023) . – Текст : электронный.
- [74]. Silica aerogel radiators for bunch length measurements / J. Bähr, V. Djordjadze, D. Lipka [et al.]. – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in

- Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2005. – Vol. 538. – № 1-3. – P. 597-607. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.098> – Дата публикации: 12.04.2004.
- [75]. 200 MeV LINAC DEVELOPMENT FOR THE SKIF LIGHT SOURCE INJECTOR / A. Andrianov, M. Arsenyeva, A. Barnyakov [et al.]. – Текст : электронный // Russian Particle Accelerator Conference (27th). – Alushta, Russia : JACoW Publishing, 2021. – Vols. 2021-Septe. – P. 68-70. – URL: <http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEA03> – Дата публикации: 27.09.2021.
- [76]. Status of NSLS-II booster / S. Gurov, A. Erokhin, S. Karnaev [et al.]. – Текст : электронный // IPAC 2013: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference. – Shanghai, China : JACoW, 2013. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2013/papers/morea053.pdf?n=IPAC2013/papers/morea053.pdf> – Дата публикации: 12.05.2013.
- [77]. The VEPP-3 electron-positron storage ring : сайт. – URL: <https://v4.inp.nsk.su/vepp3/index.en.html> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [78]. SKIF injector complex : сайт. – URL: <https://slidetodoc.com/skif-injector-complex-zhuravlev-andrey-200-me-v/> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [79]. Status of the Siberian synchrotron radiation center / A. I. Ancharov, V. B. Baryshev, V. A. Chernov [et al.]. – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2005. – Vol. 543. – № 1. – P. 1-13. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.021> – Дата публикации: 03.02.2005.
- [80]. NISR Calculate the synchrotron radiation Spectrum : сайт. – URL: <https://physics.nist.gov/MajResFac/SURF/SURF/schwinger.html> (дата обращения: 09.04.2023). – Текст : электронный.
- [81]. Пикосекундный электронно-оптический диссектор для регистрации синхротронного излучения / С. В. Андреева [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2019. — № 2. — с. 75—80. — ISSN 0032-8162. — DOI:10.1134/S0032816219020022.
- [82]. Zinin E. I. Optical dissector for longitudinal beam profile measurement / E. I. Zinin, O. I. Meshkov. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2015. – Vol. 10. – № 10. – P. P10024-P10024. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/10/P10024> – Дата публикации: 17.09.2015.
- [83]. Zinin E. I. Stroboscopic method of electro-optical picosecond-resolution chronography and its application in synchrotron radiation experiments / E. I. Zinin. – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods In Physics Research. –

1983. – Vol. 208. – № 1-3. – P. 439-441. – URL: [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)91165-1](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)91165-1) – Дата публикации: 15.04.1983.
- [84]. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях // Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники : сайт. – URL: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_112775.pdf (дата обращения: 10.04.2023)
- [85]. Соболева, Н.А. Фотоэлектронные приборы / Н.А. Соболева, А.Е. Меламид. – Москва : Высшая школа, 1974. – 375 с. – ISBN [не указан].
- [86]. Тормозящие плёнки для пикосекундных диссекторов нового поколения / Н. В. Агеева [и др.] // Автометрия. 2016. Т. 52, No 3. С. 100-107. DOI: 10.15372/AUT20160313. URL: https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/2016/3/13_ageeva.pdf.
- [87]. Стробоскопический метод электронно-оптической хронографии с пикосекундным разрешением на основе диссектора с электростатической фокусировкой и отклонением // ИЯФ СО РАН : сайт. – URL: https://www.inp.nsk.su/images/preprint/1981_084.pdf (дата обращения: 10.04.2023)
- [88]. Direct temporal-resolution calibration of new-generation dissector / E. I. Zinin, O. V. Anchugov, V. L. Dorokhov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2016. – Vol. 11. – № 3. – P. T03001-T03001. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/T03001> – Дата публикации: 09.03.2016.

Список рисунков

- Рисунок 1.1 – Спектр синхротронного излучения из дипольных магнитов суперпериода СКИФ для энергии пучка $E_b = 3000$ МэВ. Заштрихован диапазон энергий, соответствующий оптической области спектра.
 $B = 5$ кГс (красный) и $3,5$ кГс (синий) 14
- Рисунок 1.2 – Расходимость синхротронного излучения накопителя СКИФ из «сильного» диполя в вертикальной плоскости для длины волны 1 нм (красная кривая) и для «слабого» диполя на 500 нм (синяя кривая),
 $E_b = 3000$ МэВ 14
- Рисунок 1.3 – Прототип обмоток сверхпроводящего эллиптического ондулятора, разработанного в ИЯФ СО РАН, планируется использовать в накопителе СКИФ [14] 15
- Рисунок 1.4 – Спектр сверхпроводящего эллиптического ондулятора под нулевым углом. Вверху поток фотонов в секунду в телесный угол 10 микро радиан. На картинке ниже показана степень круговой поляризации [14] 16
- Рисунок 1.5 – Спектр СИ, испускаемого под углом $2-3$ мрад из пучка электронов с энергией 500 МэВ, пересекающего ондулятор с 3 периодами, $\lambda_u = 12$ см. Моделируется с помощью SRW [15] 17
- Рисунок 1.6 – Фотография здания ESRF, Гренобль, Франция [16] 18
- Рисунок 1.7 – Фотография здания SPring-8, Цукуба, Япония [17] 18
- Рисунок 1.8 – Типичные структурные функции для накопительных колец третьего поколения. Вверху: структурные функции для DBA. Внизу: структурные функции для TBA [1] 19
- Рисунок 1.9 – Сверхпроводящий шифтер с магнитным полем 10 Т - Wavelength Shifters (производства ИЯФ СО РАН), используемый в SPring-8. Устройство имеет самую высокую напряженность магнитного поля в мире [19] 20

Рисунок 1.10 – Разница между спектром СИ из поворотного магнита (1.2 Тл) и спектром СИ из шифтера с полем 6 Тл при $E_b = 2$ ГэВ, $I_b = 200$ мА: форма кривой не изменилась, но спектр стал более «жестким» [20]	20
Рисунок 1.11 – Структурные функции МВА в проекте модернизация источника СИ NSLS-II (Брукхевен, США) [21]	21
Рисунок 1.12 – Эмиттанс и энергия пучка современных источников синхротронного излучения	22
Рисунок 1.13 – Условная классификация методов диагностики пучков в ускорителях	24
Рисунок 1.14 – Схема комплекса СКИФ	29
Рисунок 1.15 – Параметры Twiss одного из суперпериодов накопителя.....	31
Рисунок 2.1 – Структура линейного ускорителя, первая ступень	33
Рисунок 2.2 – Схема измерения параметров пучка после электронной ВЧ-пушки: 1 - ВЧ-электронная пушка, 2 - ФСТ, 3 - соленоид, 4 - черенковский датчик, 5 - люминофорный экран, 6 - коллиматор, 7 - спектрометр, 8 - цилиндр Фарадея	36
Рисунок 2.3 – Схема измерения параметров пучка в канале группировки: 1 - корректор, 2 - ФСТ, 3 - соленоид, 4 - резонатор третьей гармоники, 5 - люминофорный экран, 6 - черенковский датчик, 7 - последний соленоид с ВЧ- в нем резонаторный датчик, 8 - коллиматор, 9 - спектрометр и 10 - цилиндр Фарадея	36
Рисунок 2.4 – Схема измерения параметров пучка после предускорителя: 1 - предускоритель, 2 - соленоиды, 3 - люминофорный экран, 4 - черенковский датчик, 5 - коллиматор, 6 - спектрометр, 7 - цилиндр Фарадея	37
Рисунок 2.5 – Схема измерения параметров пучка после первой ускоряющей секции: 1 - ускоряющая конструкция, 2 - вакуумный затвор, 3 - корректор, 4 - квадруполь, 5 - черенковский датчик, 6 - люминофорный экран, 7 - коллиматор, 8 - спектрометр, 9 - цилиндр Фарадея.....	37
Рисунок 2.6 – Положение люминофорных экранов и поперечные размеры пучка на стенде линейного ускорителя. Синяя кривая: σ_x ; черная кривая: σ_y	38

Рисунок 2.7 – Принципиальная схема конструкции люминофорного экрана....	39
Рисунок 2.8 – Схема конструкции люминофорного экрана на линейном ускорителе СКИФ	40
Рисунок 2.9 – Люминофорный экран, закрепленный на линейном актуаторе САНВ-10 (слева). Сборка люминофорного экрана в конструкции ускорителя (справа)	40
Рисунок 2.10 – Люминофорный экран, наблюдаемый камерой, без пучка	41
Рисунок 2.11 – Зависимость светового потока кристаллического люминофора от заряда падающего на него пучка	42
Рисунок 2.12 – Световая эффективность различных люминофорных порошков	44
Рисунок 2.13 – Внешний вид линейного актуатора САНВ-10	46
Рисунок 2.14 – Внешний вид цифровой камеры MER-131-75GM	47
Рисунок 2.15 – Схема спектрометра: 1 - коллиматор пучка, управляемый шаговым двигателем, 2 - блок цифровой камеры, 3 - вакуумное окно, 4 - магнитопровод, 5 - катушки, 6 - вакуумная камера, 7 - пластина с нанесенным люминофором, 8 - выходное окно из титана	49
Рисунок 2.16 – Три люминофорных экрана с фланцами перед установкой в магнитном спектрометре	49
Рисунок 2.17 – Схема коллиматора на входе спектрометра	50
Рисунок 2.18 – Дипольный магнит спектрометра	51
Рисунок 2.19 – Расчетное продольное распределение магнитного поля, ток в катушке 53 А	51
Рисунок 2.20 – Дипольный магнит с датчиками Холла на стенде	52
Рисунок 2.21 – Кривая зависимости температуры катушки от времени при токе в обмотке $I = 36$ А	53
Рисунок 2.22 – Относительная однородность магнитного поля в поперечном сечении при различных токах в обмотке магнита	54
Рисунок 2.23 – Распределения интегральной однородности магнитного поля при различных токах в обмотке магнит	55
Рисунок 2.24 – Траектория частицы в магнитном поле	55

Рисунок 2.25 – Зависимость между сдвигом энергии относительно среднего значения и смещением частицы относительно центра экрана.....	57
Рисунок 2.26 – Зависимость между углом частицы относительно оси и ее смещением на люминофорном экране.....	58
Рисунок 2.27 – Зависимость между начальным смещением x_i частицы и ее отклонением от центральной точки люминофорного экрана	58
Рисунок 2.28 – Траектория пучка с энергией 47,4 МэВ в диполе.....	59
Рисунок 2.29 – Моделируемое угловое распределение гамма-фотонов. Гистограмма представляет собой область щели.....	60
Рисунок 2.30 – Распределение плотности частиц, прошедших через щель коллиматора, на люминофорном экране. Сравниваются профили распределения для монохроматического пучка и пучка с проектным энергетическим разбросом.....	61
Рисунок 2.31 – Смоделированный продольный профиль пучка.....	62
Рисунок 2.32 – Смоделированное распределение пучка на люминофорном экране при энергии, соответствующей разным каскадам линейного ускорителя	63
Рисунок 2.33 – Схема расположения люминофорного экрана (VI-TB1.PL1) и диполя (MG-TB1.BM1) в канале линейного ускорителя-бустер, которые будут использованы для измерения энергии и энергетического разброса пучка линака при $E_b = 200$ МэВ.....	64
Рисунок 2.34 – Распределение пучка по координатам и импульсу перед входом в диполь MG-TB1.BM1 после линейного ускорителя	65
Рисунок 2.35 – Энергетический распределение частиц после линейного ускорителя перед входом в диполь MG-TB1.BM1, заданных при моделировании.....	65
Рисунок 2.36 – Смещение изображения на люминофорном экране и соотношение между энергией пучка и максимумом интенсивности в изображении пучка для энергетических распределений	66

Рисунок 2.37 – Распределение частиц по энергии перед входом в диполь (слева). Распределение положения частиц на люминофорном экране (справа)	67
Рисунок 2.38 – Зависимость между стандартным отклонением энергии и стандартным отклонением распределения частиц на люминофорном экране для частиц с одинаковой средней энергией.	67
Рисунок 2.39 – Расположение черенковских датчиков в структуре линейного ускорителя	68
Рисунок 2.40 – Определение угла черенковского излучения.....	69
Рисунок 2.41 – Принципиальная схема распространения черенковских фотонов, генерируемых двумя электронами в среде с показателем преломления n .	70
Рисунок 2.42 – Геометрия расчета угла конуса Черенкова	71
Рисунок 2.43 – Угловое распределение черенковского излучения пучка электронов с энергией 0,6 МэВ через кварцевую пластину разной толщины. Выделен диапазон по углу в 3,5 градуса	73
Рисунок 2.44 – Угловые распределения черенковских фотонов, испускаемых электронным пучком с энергией 3 МэВ и 50 МэВ, проходящим через 5 мм аэрогель.....	73
Рисунок 2.45 – Схема черенковского датчика для измерения продольного профиля пучка.....	74
Рисунок 2.46 – Схема конуса черенковского датчика на примере случая $E_b = 3$ МэВ	75
Рисунок 2.47 – Устройство черенковского датчика.....	76
Рисунок 2.48 – Схематическое устройство стрик-камеры.....	77
Рисунок 2.49 – Внешний вид стрик-камеры PS-1/S20	77
Рисунок 2.50 – Схема подключения цилиндра Фарадея.....	79
Рисунок 2.51 – Моделирование при $E_b = 200$ МэВ (а) соотношения первичных и вторичных электронов, вылетающих на выходе из цилиндра Фарадея, в зависимости от толщины цилиндра L и (б) количества первичных и вторичных электронов, вылетающих с поверхности цилиндра Фарадея, в зависимости от R	81

Рисунок 2.52 – Моделирование при $E_b = 200$ МэВ (а) соотношения первичных и вторичных электронов, вылетающих на выходе из цилиндра Фарадея, в зависимости от толщины L и (б) количества первичных и вторичных электронов, вылетающих с поверхности цилиндра Фарадея, в зависимости от R	81
Рисунок 2.53 – Вторичный электронный ливень при энергии 200 МэВ.....	82
Рисунок 2.54 – Распределение электронов на поверхности, расположенной на 1200 мм ниже оси спектрометра	83
Рисунок 2.55 – Вторичный электронный ливень и детали после диполя	83
Рисунок 2.56 – Распределение частиц после диполя. Сверху вниз и слева направо распределение 1 см, 13 см, 28 см, 48 см от выхода диполя.....	84
Рисунок 2.57 – Угол между направлением в распределении ливня и осью пучка	85
Рисунок 2.58 – Фотография радиационной защиты цилиндра Фарадея, установленной на стенде линейного ускорителя.....	85
Рисунок 3.1 – Средства диагностики для отладки ВЧ пушки: 1- люминофорный экран, 2-черенковский датчик, 3 - коллиматор, 4 - спектрометр, 5 - цилиндр Фарадея	86
Рисунок 3.2 – Типичное изображение пучка, записанное с помощью люминофорного экрана.....	87
Рисунок 3.3 – Схема измерения эмиттанса пучка	88
Рисунок 3.4 – Определение эмиттанса пучка ВЧ пушки с помощью соленоидального сканирования. Точность измерения размера (FWHM) $\pm 5\%$	89
Рисунок 3.5 – Диагностическая схема после предускорителя. 1 - люминофорный экран, 2 - черенковский датчик	90
Рисунок 3.6 – Схема диагностической системы в конце прототипа линейного ускорителя. 1 - черенковский датчик, 2 - люминофорный экран, 3 - коллиматор, 4 - спектрометр, 5 - цилиндр Фарадея.....	91

- Рисунок 3.7 – Профиль пучка после ускоряющей структуры, $\sigma_x = 0,8 \pm 0,1$ мм,
 $\sigma_y = 0,9 \pm 0,1$ мм 91
- Рисунок 3.8 – Определение эмиттанса пучка с помощью квадрупольного сканирования после ускоряющей структуры при энергии пучка $E_b = 32$ МэВ и длительности $\tau_b = 25 \pm 3$ пс (FWHM). Точность измерения размера (FWHM) $\pm 5\%$ 91
- Рисунок 3.9 – Схема участка ускорительного тракта, где расположены корректор и люминофор (вверху). Внешний вид соответствующих элементов в зале ускорителя (внизу)..... 93
- Рисунок 3.10 – Центр тяжести изображения, записанного на люминофоре, смещается при изменении тока корректора 94
- Рисунок 3.11 – Измерение энергии пучка по его смещению на люминофорном экране под действием магнитного корректора 94
- Рисунок 3.12 – Измеренные энергии пучка в зависимости от ВЧ мощности, приложенной к резонатору пушки 95
- Рисунок 3.13 – Определение энергетического разброса пучка с помощью магнитного спектрометра. Зеленая кривая – зарегистрированный профиль пучка, желтая кривая – подгонка Гауссовым распределением 96
- Рисунок 3.14 – Смещение пучка в зависимости от тока корректора..... 97
- Рисунок 3.15 – Изображения пучка регистрируются при одинаковой энергии двумя люминофорными экранами спектрометра, расположенными на расстоянии 200 и 350 мм от входа соответственно. $E_b = 27 \pm 0,3$ МэВ 98
- Рисунок 3.16 – Изображение пучка на 3-м люминофорном экране спектрометра при одинаковой энергии и разных токах в дипольном магните 98
- Рисунок 3.16 – Зависимость смещения максимума изображения пучка на 2-м люминофорном экране магнитного спектрометра в зависимости от тока диполя 99
- Рисунок 3.18 – Пучок регистрируется третьим люминофорным экраном магнитного спектрометра для определения энергетического разброса.

Ширина пучка на полувысоте 6,8 мм. Измеренная величина энергетического разброса: $\Delta E = 1,6 \pm 0,1$ МэВ (FWHM).....	100
Рисунок 3.19 – Слева: контактные площадки для сигнального кабеля ЦФ, снижающие паразитную индуктивность. Справа: схема подключения ЦФ для регистрации широкополосного сигнала	101
Рисунок 3.20 – Типичный сигнал с ЦФ при измерениях заряда ВЧ пушки	102
Рисунок 3.21 – Сигнала ЦФ при работе на высокоомный вход осциллографа ($R = 1$ МОм)	103
Рисунок 3.22 – Заряд пучка ВЧ пушки в зависимости от напряжения смещения на модулирующей сетке.....	103
Рисунок 3.23 – Внешний вид линейного ускорителя и вторая версия ЦФ крупным планом	104
Рисунок 3.24 – Сигнал с ЦФ, установленного после ускоряющей структуры для измерения заряда пучка с энергией $E_b = 32$ МэВ и более.....	105
Рисунок 3.25 – Схема измерений продольного профиля пучка после ВЧ пушки	106
Рисунок 3.26 – Схема расчета по геометрической оптике черенковского датчика для большого углового разброса излучения	106
Рисунок 3.27 – Изображение пучка в черенковском свете, но не то, что обычно подразумевают под черенковскими кольцами. Слева: один сгусток в пучке, справа: 5 сгустков в пучке	107
Рисунок 3.28 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 65$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = -0,78 рад, фазе пушки = 99° , напряжение модулятора $U_m = 70$ В	108
Рисунок 3.29 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 56,1$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = -0,58 рад, фазе пушки = 99° , напряжение модулятора $U_m = 70$ В	109

- Рисунок 3.30 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 50$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = $-0,38$ рад, фазе пушки = 99° , напряжение модулятора $U_m = 70$ В 109
- Рисунок 3.31 – Изображение и распределение пучка, длина пучка $\tau_b = 60$ пс (FWHM), зарегистрированные черенковским датчиком при фазе резонатора ВЧ пушки = $-0,58$ рад, фазе пушки = 76° , напряжение модулятора $U_m = 50$ В 110
- Рисунок 3.32 – Продольные размеры пучка, зарегистрированные при разных фазах резонатора ВЧ пушки первым черенковским датчиком при напряжении модулятора $U_m = 70$ В. Резонатор третьей гармоники включен 110
- Рисунок 3.33 – Регистрация многосгусткового режима работы ускорителя при развертке стрик-камеры 30 нс. Продольный профиль одного сгустка не удается разрешить во времени. Однако при развертке камеры 0,25 нс полуширина изображения сгустка соответствует временному интервалу 5 пс, что достаточно для исследования его продольного профиля 112
- Рисунок 3.34 – Аппаратная функция и развернутое изображение одного сгустка. Видно, что достигнутое временное разрешение позволяет надежно определить длительность сгустка на уровне нескольких пикосекунд 113
- Рисунок 3.35 – Изображение пучка, записанные в режиме «фокус» стрик-камеры. Оптимизирована аппаратная функция черенковского детектора, ширина аппаратной функции равна 2,8 пс (FWHM). 114
- Рисунок 4.1 – Цикл работы бустера от инъекции до экстракции пучка..... 115
- Рисунок 4.2 – Расположение мест вывода СИ из вакуумной камеры бустера. 117
- Рисунок 4.3 – Спектр СИ из дипольных магнитов. $B = 5$ кГс (красный) и $3,5$ кГс (синий) для энергии пучка 3000 МэВ 118
- Рисунок 4.4 – Спектр СИ из дипольных магнитов для энергии пучка $E_b = 200$ МэВ 119

Рисунок 4.5 – Поток фотонов в видимом диапазоне из дипольных магнитов для разных энергий пучка.....	120
Рисунок 4.6 – Сборочный чертеж диагностики поперечного профиля пучка бустера СКИФ. На оптическом столе располагаются объектив, оптический аттенюатор, цифровая и аналоговая камеры.....	121
Рисунок 4.7 – Сборочный чертеж диагностики продольного профиля пучка бустера СКИФ. На оптическом столе располагаются стрик-камера и электронно-оптический диссектор.....	121
Рисунок 4.8 – Схема модифицированной оптической диагностики пучка ускорителя ВЭПП-3.....	122
Рисунок 4.9 – Установка прототипа диагностической системы в рабочем пространстве ВЭПП-3. Диссектор снят.....	122
Рисунок 4.10 – Спектр СИ из дипольного магнита ВЭПП-3 для энергии пучка $E_b = 2000$ МэВ. Заштрихован диапазон энергий, соответствующий оптической области спектра.....	123
Рисунок 4.11 – Оптическая схема измерения продольного и поперечных размеров пучка.....	124
Рисунок 4.12 – Упрощенная схема устройства диссектора.....	125
Рисунок 4.13 – Интерфейс программы, основанный на Python PyQt5. Каждая функция отмечена на рисунке красным цветом.....	126
Рисунок 4.14 – Динамика поперечного размера пучка во время инъекции в ВЭПП-3.....	128
Рисунок А.1 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z , при $I = 2$ А.....	159
Рисунок А.2 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z , при $I = 5$ А.....	159
Рисунок А.3 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z , при $I = 9$ А.....	160
Рисунок А.4 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z , при $I = 13$ А.....	160

Рисунок А.5 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при $I = 36$ А	161
Рисунок А.6 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при $I = 50$ А	161

Список таблиц

Таблица 1.1 – Основные параметры накопительного кольца СКИФ	29
Таблица 1.2 – Основные параметры линейного ускорителя СКИФ	30
Таблица 1.3 – Основные параметры бустера СКИФ	30
Таблица 2.1 – Параметры линейного ускорителя СКИФ	32
Таблица 2.2 – Список основных элементов линейного ускорителя инжектора СКИФ	34
Таблица 2.3 – Расчетные энергии и энергетический разброс пучка в точках измерения с помощью магнитного спектрометра	38
Таблица 2.4. Параметры некоторых порошкообразных люминофоров	43
Таблица 2.5 – Параметры люминофора Р43.....	44
Таблица 2.6 – Оптические/сцинтилляционные свойства Chromox.....	45
Таблица 2.7 – Физические свойства.....	45
Таблица 2.8 – Параметры MER-131-75GM	47
Таблица 2.9 – Результаты измерения дипольного магнита	53
Таблица 2.10 – Параметры расчета экрана магнитного спектрометра.....	61
Таблица 2.11 – Соответствующие датчики временного разрешения, размера пучка и коэффициента преломления вещества радиатора.	70
Таблица 2.12 – Соответствие между энергией пучка и углом черенковского конуса.....	71
Таблица 2.13 – Толщина и угол конусного радиатора, соответствующие каждой энергии.....	75
Таблица 2.14 – Параметры стрик-камеры PS-1/S20	78
Таблица 4.1 – Параметры ВЭПП-3.....	116
Таблица 4.2 – Параметры бустера.....	117
Таблица 4.3 – Вычисленные размеры пучка в точке излучения при энергии 3 ГэВ.....	118
Таблица 4.4 – Параметры пучка СИ в оптическом диапазоне в точке излучения при энергии бустера $E_b = 3$ ГэВ.....	119

Таблица 4.5 – Вычисленные размеры пучка в ВЭПП-3 в точке излучения при энергии 2 ГэВ, $B = 2$ Т	123
---	-----

Приложение А. Результаты измерений магнитного поля дипольного магнита спектрометра

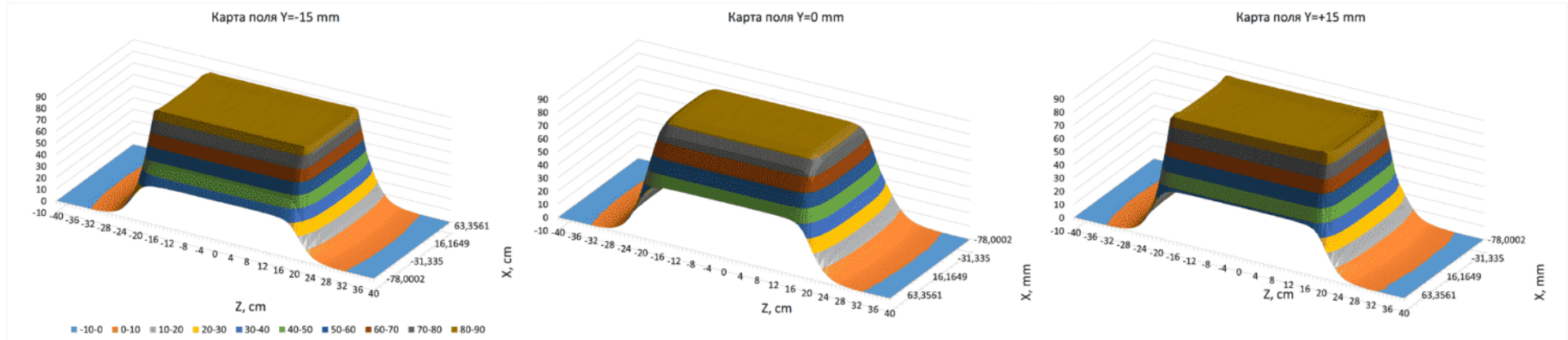


Рисунок А.1 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при $I = 2$ А

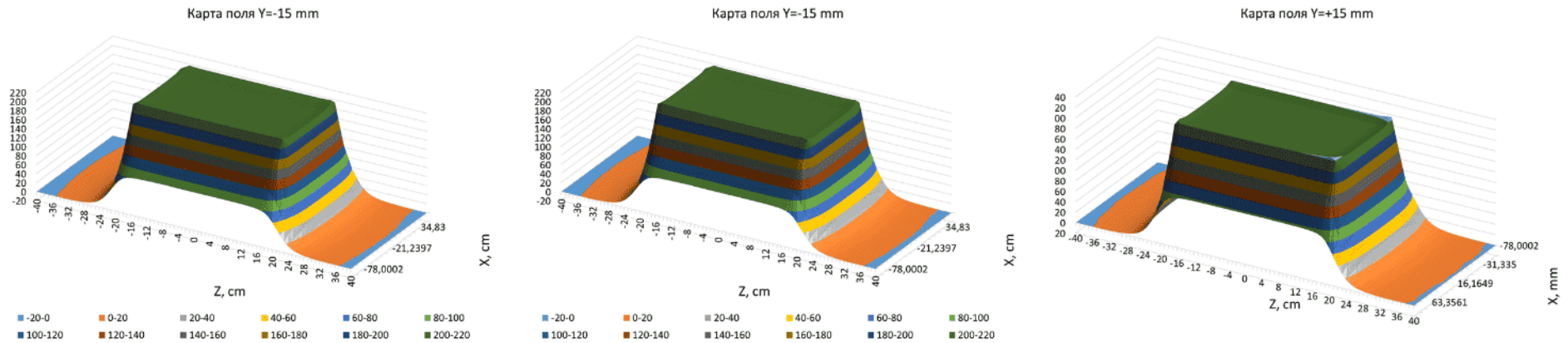


Рисунок А.2 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при $I = 5$ А

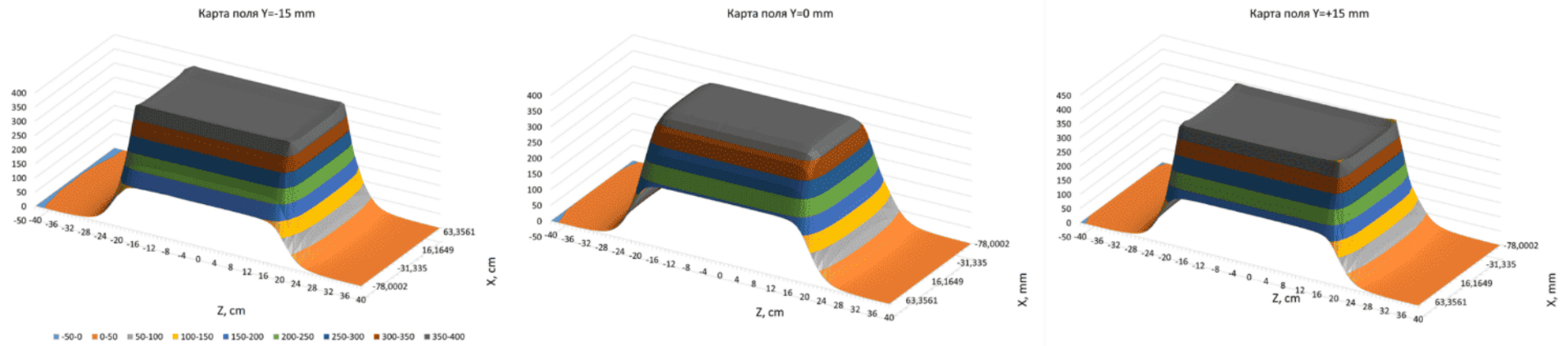


Рисунок А.3 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при $I = 9 \text{ A}$

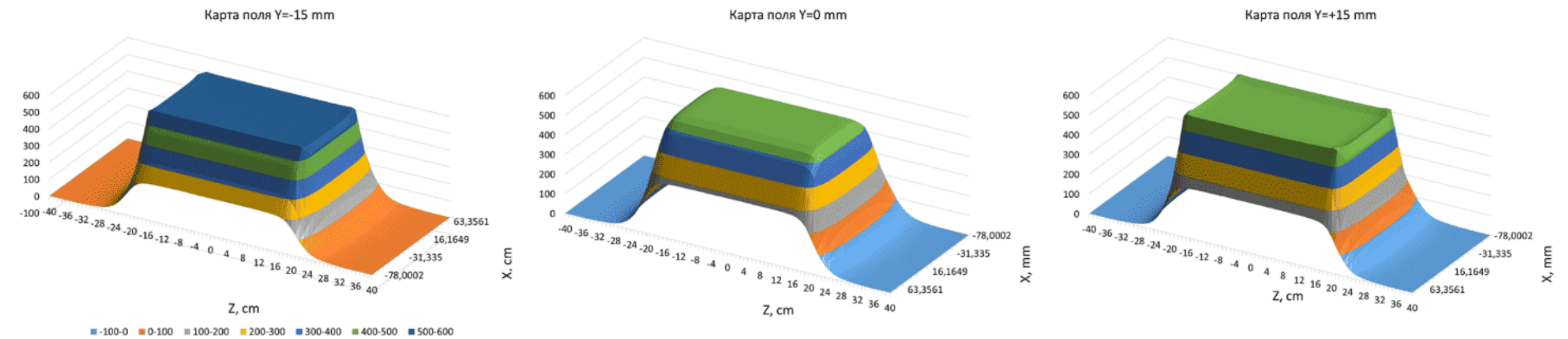


Рисунок А.4 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при $I = 13 \text{ A}$

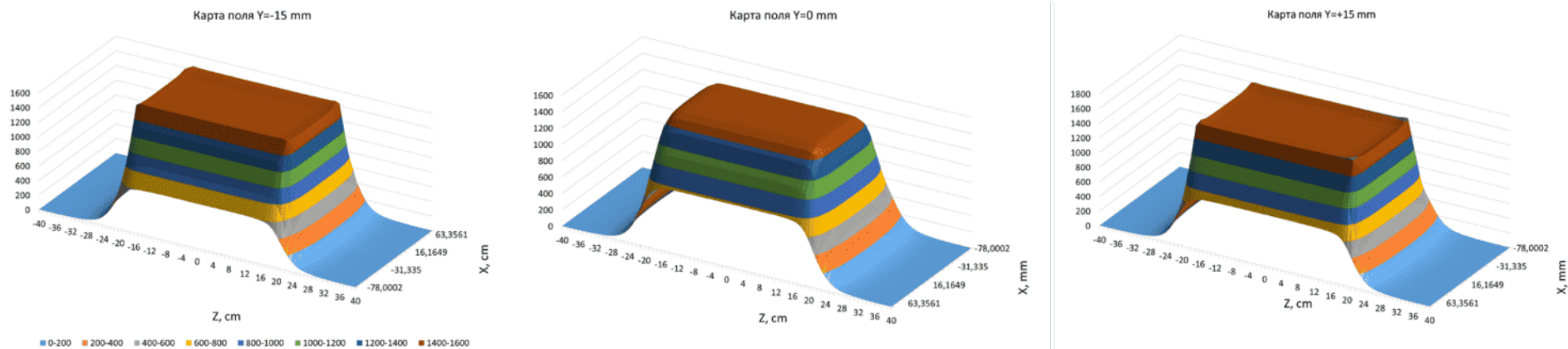


Рисунок А.5 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при I = 36 А

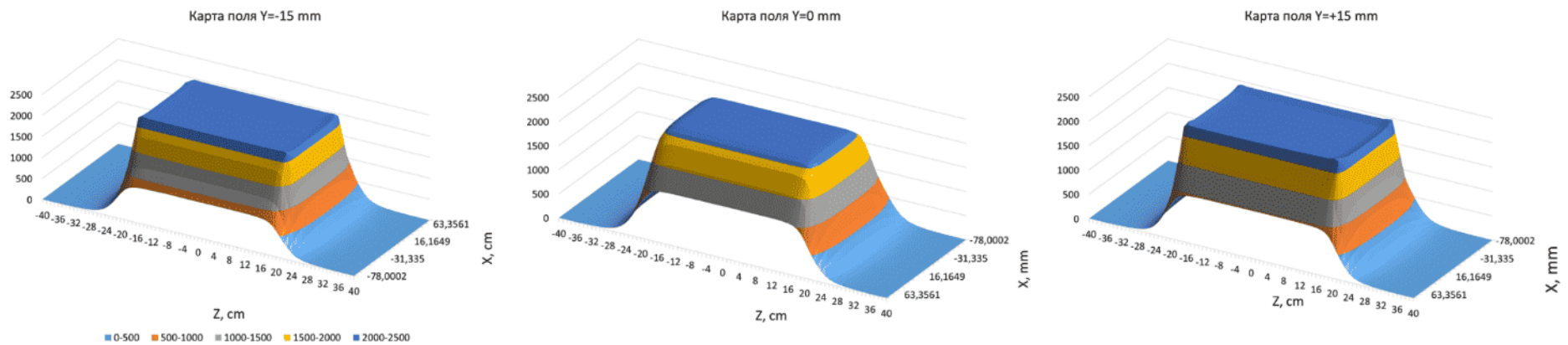


Рисунок А.6 – Трехмерные измерения распределения магнитного поля вдоль направления z, при I = 50 А