

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Фокусировка когерентного переходного излучения для целей диагностики электронных пучков в современных ускорителях УДК 621.384.665:635.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Гусвицкий Тодор Муратович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Трясучев Владимир Андреевич	д.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник ИШФВП	Потылицын Александр Петрович	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Елена Владимировна	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Общекультурные компетенции	
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерная физика и технологии
Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
Бычков П.Н.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Б	Гусвицкий Тодор Муратович

Тема работы:

Фокусировка когерентного переходного излучения для целей диагностики электронных пучков в современных ускорителях

Утверждена приказом директора (дата, номер)	12.03.2019. №1862/с
---	---------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Когерентное оптическое переходное излучение, угловое распределение, электронный пучок, интенсивность излучения.
--------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Анализ и обзор литературы. 2. Изучение методик диагностики пучков. 3. Моделирование угловых распределений интенсивности когерентного и некогерентного оптического переходного излучения. 4. Получение зависимости поперечного размера электронного пучка от одного из параметров распределения интенсивности когерентного оптического переходного излучения на детекторе, находящемся в фокусе линзы.
Перечень графического материала	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Латышева Елена Владимировна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Трясучев Владимир Андреевич	д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Б	Гусвицкий Тодор Муратович		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла
 Период выполнения (весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2019

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.19	Составление и утверждение технического задания	7
05.03.19	Подбор и изучение материалов по теме	10
16.03.19	Выбор направления исследования	5
8.04.19	Проведение эксперимента	45
07.05.19	Анализ и описание результатов	30
20.05.19	Подготовка к защите ВКР	7

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Трясучев Владимир Андреевич	д.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник ИШФВП	Потылицын Александр Петрович	д.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Гусвицкий Тодор Муратович

Институт	Кафедра
Уровень образования	Направление/специальность
бакалавр	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Ноутбук, лицензия Wolfram Mathematica; тариф на промышленную электроэнергию 5,8 за 1 кВт; работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; оклад исполнителя и руководителя в соответствии с тарифной сеткой окладов ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Районный коэффициент города Томска -1,3.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Размер страховых взносов - 30%. Пониженная ставка - 27,1%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	SWOT-анализ

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>	
2. <i>Матрица SWOT</i>	
3. <i>Альтернативы проведения НИ</i>	
4. <i>График проведения и бюджет НИ</i>	
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Елена Владимировна	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Гусвицкий Тодор Муратович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Б	Гусвицкий Тодор Муратович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	– требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	08.04.19
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к. ф.-м. н.		08.04.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Б	Гусвицкий Тодор Муратович		

Содержание

Аннотация	12
Реферат	13
Введение.....	14
1 Теоретическая модель	17
2 Моделирование когерентного оптического переходного излучения.....	27
2.1 Угловое распределение когерентного оптического переходного излучения в дальней и ближней волновых зонах	28
2.2 Фокусировка когерентного оптического переходного излучения на детекторе	30
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	36
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования	36
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	36
3.1.2 SWOT-анализ	37
3.2 Планирование научно-исследовательской работы.....	38
3.2.1 Определение трудоемкости выполнения работ	40
3.2.2 Разработка графика проведения научного исследования.....	42
3.2.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	44
3.2.3.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	45
3.2.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы	45
3.2.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды.....	47
3.2.3.4 Накладные расходы	48
3.2.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	48

3.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .	49
4 Социальная ответственность	52
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	52
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПК.	54
4.2.1 Организационные мероприятия	54
4.2.2 Организация рабочего места оператора ПК.....	54
4.2.3 Условия безопасной работы	56
4.3 Электробезопасность.....	58
4.5 Пожарная и взрывная безопасность.....	61
Заключение	63
Список использованных источников.....	65

Аннотация

Основным методом диагностики поперечного размера электронных пучков в ускорителях является метод диагностики поперечного профиля пучка по испускаемому им переходному излучению при пересечении границы раздела двух сред.

В современных ускорительных установках, таких как лазеры на свободных электронах и ускорители, работающие по принципу лазерно-плазменного ускорения, электронные сгустки могут достигать фемтосекундной и аттосекундной длительности, диагностику которых невозможно проводить, используя традиционные методы. При длительности сгустка, сравнимой с длиной волны излученного сгустком переходного излучения, необходимо учитывать эффект когерентности при рассмотрении переходного излучения от каждого электрона в сгустке.

При высоких энергиях электронного пучка расположение детектора в дальней волновой зоне, где угловое распределения переходного излучения не зависит от расстояния между источником и точкой наблюдения, становится невозможным. Однако, данное препятствие обходится с помощью применения линзы, которая фокусирует переходное излучение на детекторе, что позволяет избежать влияние ближней волновой зоны на угловое распределение переходного излучения на детекторе.

В данной работе было исследовано угловое распределение когерентного переходного излучения в дальней и ближней волновой зоне, его зависимость от поперечного размера пучка и влияние линзы на распределение излучения в плоскости детектора при положении линзы как в ближней, так и в дальней волновой зоне. В результате была получена линейная зависимость, связывающая размеры изображения сгустка на детекторе с реальным поперечным размером сгустка.

Реферат

Выпускная квалификационная работа 64 с., 18 рис., 11 табл., 10 источников.

Ключевые слова: когерентное переходное излучение, моделирование, Wolfram Mathematica

Объектом исследования является: когерентное переходное излучение

Цель работы – определение зависимости между поперечным микронным или субмикронным размером электронного сгустка и пространственным распределением когерентного переходного излучения от этого сгустка в плоскости детектора (изображением профиля сгустка).

Исследование проводилось путём моделирования характеристик когерентного переходного излучения в программном пакете Wolfram Mathematica.

Степень внедрения: В настоящее время предмет исследования находится в стадии теоретической проработки.

Область применения: Диагностика пучков заряженных частиц на ускорителях.

Экономическая эффективность/значимость работы на данный момент не установлена, так как предмет исследования находится в стадии теоретической разработки.

Введение

Переходное излучение - излучение, образующееся при пересечении заряженной частицей раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью или при близком пролете к такому разделу [1]. Механизм этого излучения может быть объяснен динамической поляризацией электронных оболочек атомов среды [2]. Если заряженная частица будет падать из вакуума на мишень из определенного материала конечной толщины, как показано на РИС, то переходное излучение будет наблюдаться как в направлении «назад», так и «вперёд». Отсюда идет разделение этого излучения на переходное излучение назад и вперед. Переходное излучение вперед испускается всегда вдоль траектории частицы, причем излучение формируется в виде конуса с нулевой интенсивностью вдоль траектории и максимумами, расположенными под углами $1/\gamma$ к траектории частицы, где γ - Лоренц фактор частицы (рисунок 1) [1].

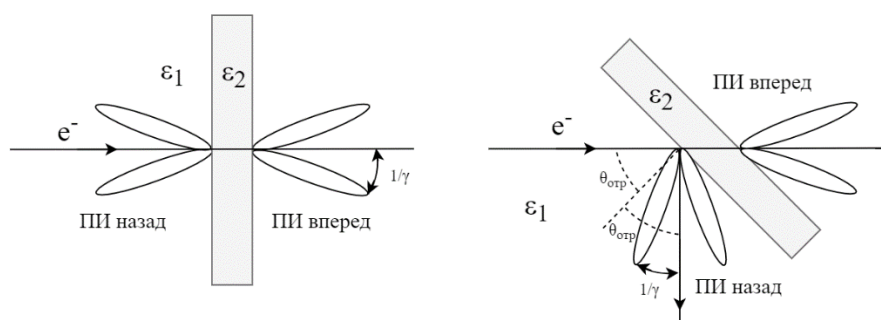


Рисунок 1 – Схема формирования переходного излучения при пересечении электроном мишени с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , находящейся в вакууме (ϵ_1).

Переходное излучение назад обладает тем же характером, но направленно не вдоль траектории частицы, а вдоль угла отражения, как если бы поле частицы претерпело отражение от поверхности раздела сред [1]. Именно этим свойством переходного излучения назад и пользуются при диагностике пучков заряженных частиц, так как оно позволяет размещать детектирующие системы вне траектории пучка.

Источником излучения является область на поверхности раздела двух сред, электронные оболочки атомов которой возбуждаются кулоновским полем падающей частицы. Размер этой области характеризуется величиной $\gamma\lambda$ (γ – Лоренц-фактор, λ – длина волны излучения) [2]. Хотя источник переходного излучения и не является точечным, однако его можно считать таковым с расстояния, характеризующегося величиной $\lambda\gamma^2$. Такая область называется дальней волновой зоной и угловое распределение переходного излучения в ней не зависит от расстояния до источника. При расстояниях меньше $\lambda\gamma^2$ наблюдается так называемая ближняя волновая зона, где переходное излучение от каждого элементарного излучателя источника интерферирует друг с другом, что сказывается на зависимости углового распределения переходного излучения от расстояния до источника. Разделение на дальнюю и ближнюю волновую зону вызвано таким характером переходного излучения, как расходимость, которая равна γ^{-1} .

В реальных экспериментах значение $\lambda\gamma^2$ [3] может достигать значений, не позволяющих разместить детектор в дальней волновой зоне. В таком случае, между детектором и источником переходного излучения, то есть мишенью, обычно располагают линзу, которая фокусирует переходное излучение на детекторе, что позволяет избавиться от влияния ближней волновой зоны.

Спектрально-угловое распределение переходного излучения сгустка заряженных частиц описывается следующей формулой [4]:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = N \frac{d^2W^{inc}}{d\omega d\Omega} + N(N-1) \frac{d^2W^{coh}}{d\omega d\Omega}. \quad (1)$$

Здесь $\frac{d^2W^{inc}}{d\omega d\Omega}$ – некогерентная составляющая излучения; $\frac{d^2W^{coh}}{d\omega d\Omega}$ – когерентная составляющая излучения; N – количество частиц в электронном сгустке. Как было указано ранее, в современных ускорителях, таких как лазеры на свободных электронах и лазероплазменные ускорители, размеры электронных сгустков могут достигать субмикронных размеров, а их населенность может быть равна порядка 10^{10} е-/сгусток. Как видно из формулы (1), в таком случае

некогерентной составляющей можно пренебречь, так как она будет в N раз меньше когерентной части. Когерентность излучения от электронов в сгустке благоприятно сказывается на увеличении интенсивности испущенного сгустком переходного излучения. В отдельных случаях это позволяет получать изображения пучка по одному сгустку [5], в то время как в некогерентном случае приходится набирать статистику с нескольких сгустков.

Метод измерения поперечного размера электронного пучка по оптическому переходному излучению является наиболее точным методом диагностики. С его помощью можно измерять размер субмикронных электронных сгустков, что невозможно достичь при использовании других методов диагностики, например, с применением люминофорных экранов. Кроме того, метод позволяет в непрерывном режиме следить за состоянием размера электронного пучка в ускорителе, что крайне необходимо для стабилизации разброса в значениях лазерного усиления в лазере на свободных электронах, так как лазерное усиление чувствительно к изменению размеров электронных сгустков в пучке.

1 Теоретическая модель

Зачастую, в экспериментах для измерения поперечного размера электронного пучка используется следующая схема (рисунок 2).

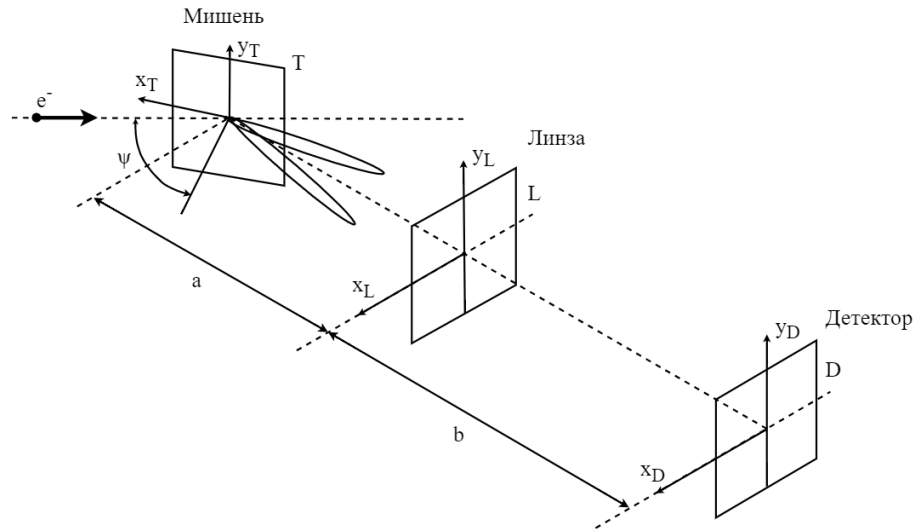


Рисунок 2 – Схема получения изображения распределения оптического переходного излучения от падающего на мишень (Т) единичного электрона на детекторе (D), находящемся в фокусе линзы (L). a – расстояние от мишени до линзы; b – расстояние между линзой и детектором; $\psi = 45^\circ$.

Как видно из рисунка 2, электрон падает на наклонную под 45° мишень (Т), после чего переходное излучение фокусируется линзой (L) на детекторе (D). Т.к. измеряемые пучки электронов в большинстве случаев ультрарелятивистские, то можно воспользоваться параксиальным приближением и, не учитывая наклона мишени, производить вычисления как для переходного излучения вперед [3].

Используя теорию дифракции и приближения Френеля, можно получить следующее выражение для напряженности поля ПИ в плоскости линзы [6]:

$$E_{\{x,y\}}^L(x_L, y_L) = \text{const} \int dx_T dy_T \frac{\{x_T, y_T\}}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2}} K_1 \left(\sqrt{x_T^2 + y_T^2} \right) \times \exp \left[i \frac{x_T^2 + y_T^2}{4\pi R} \right] \cdot \exp[-i(x_T x_L + y_T y_L)]. \quad (2)$$

В формуле используются следующие безразмерные величины: $x_T = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * X_T$ – размер мишени по X; $y_T = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * Y_T$ – размер мишени по Y; $x_L = \frac{\gamma}{a} * X_L$ – координата X линзы; $y_L = \frac{\gamma}{a} * Y_L$ – координата Y линзы; $R = \frac{a}{\lambda\gamma^2}$ – расстояние от мишени до оптической системы. $K_1(\sqrt{x_T^2 + y_T^2})$ – модифицированная функция Бесселя. Кроме того, в формуле опускаются размерные константы, так как они не играют роли в определении формы поля.

Распределение интенсивности в плоскости линзы будет определяться следующим выражением [6]:

$$\frac{d^2 W_{\{x,y\}}^L(x_L, y_L)}{dx_L dy_L} = \text{const} |E_{\{x,y\}}^L(x_L, y_L)|^2. \quad (3)$$

На рисунках 3 и 4 изображены результаты расчета распределения интенсивности в плоскости линза для различных значений расстояния между мишенью и линзой.

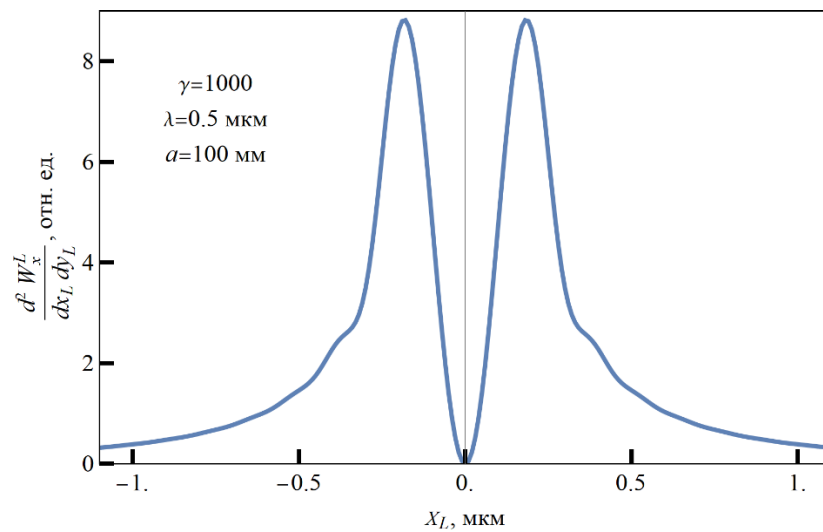


Рисунок 3 – Распределение интенсивности оптического переходного излучения от единичного электрона в плоскости линзы, находящейся от мишени на расстоянии $a = 100$ мм (ближняя волновая зона).

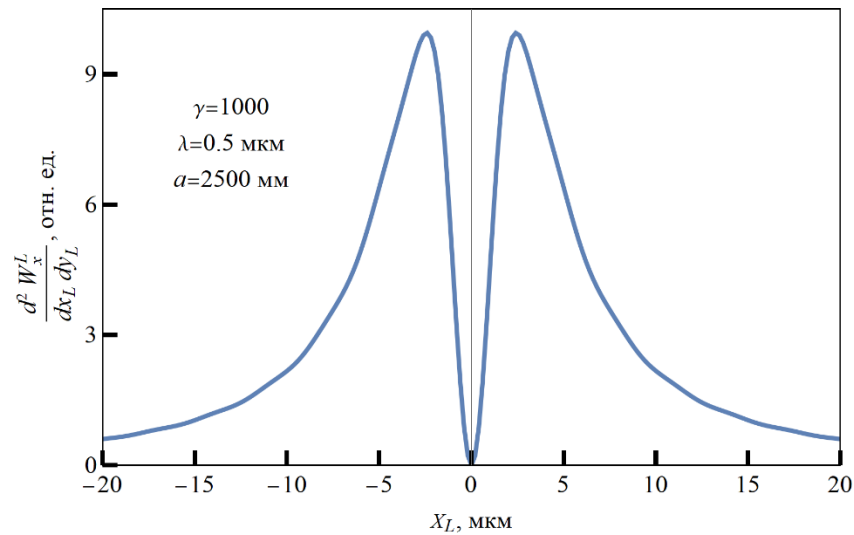


Рисунок 4 – Распределение интенсивности оптического переходного излучения от единичного электрона в плоскости линзы, находящейся от мишени на расстоянии $a = 500$ мм (дальняя волновая зона).

Как видно из приведенных выше графиков, при расстояниях $a < \lambda\gamma^2$ на распределение начинает оказывать влияние конечный размер источника, другими словами, наблюдение излучения происходит в ближней волновой зоне. При расстояниях $a \gg \lambda\gamma^2$ источник переходного излучения из плоскости наблюдения можно считать точечным. Отсюда следует, что диагностика пучка без применения линзы, то есть при непосредственном наблюдении переходного излучения на детекторе сразу после генерации, связана иногда с невозможностью помещения детектора в дальнюю волновую зону, что затрудняет процесс диагностики пучка.

Выражение для напряженности поля переходного излучения в плоскости детектора, находящегося в фокусе упомянутой выше линзы, записывается аналогично выражению (2) с добавлением ещё одного множителя в виде экспоненты, описывающего распространение излучения от линзы до детектора, и интегрирования по поверхности линзы [6]:

$$E_{\{x,y\}}^D(x_D, y_D) = \text{const} \int dx_T dy_T \int dx_L dy_L \frac{\{x_T, y_T\}}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2}} K_1 \left(\sqrt{x_T^2 + y_T^2} \right) \times \quad (4)$$

$$\times \exp \left[i \frac{x_T^2 + y_T^2}{4\pi R} \right] \cdot \exp[-i(x_T x_L + y_T y_L)] \cdot \exp \left[-i \left(x_L \frac{x_D}{M} + y_L \frac{y_D}{M} \right) \right].$$

Как и в выражении (2) ранее используются следующие безразмерные величины: $x_T = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * X_T$ – размер мишени по X; $y_T = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * Y_T$ – размер мишени по Y; $x_L = \frac{\gamma}{a} * X_L$ – размер линзы по X; $y_L = \frac{\gamma}{a} * Y_L$ – размер линзы по Y; $x_D = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * X_D$ – координата X детектора; $y_D = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * Y_D$ – координата Y детектора; $R = \frac{a}{\lambda\gamma^2}$ – расстояние от мишени до оптической системы; M – оптическое усиление линзы. В случае прямоугольной линзы ($-x_m \leq x_L \leq x_m$, $-y_m \leq y_L \leq y_m$) данный интеграл вычисляется достаточно легко. Внутренний двойной интеграл можно взять аналитически [6]:

$$\int_{-x_m}^{x_m} dx_L \int_{-y_m}^{y_m} dy_L \exp \left[-ix_L \left(x_T + \frac{x_D}{M} \right) \right] \exp \left[-iy_L \left(y_T + \frac{y_D}{M} \right) \right] = \quad (5)$$

$$= 4 \frac{\sin \left[x_m \left(x_T + \frac{x_D}{M} \right) \right]}{x_T + \frac{x_D}{M}} \cdot \frac{\sin \left[y_m \left(y_T + \frac{y_D}{M} \right) \right]}{y_T + \frac{y_D}{M}}.$$

Выражение (4) с учетом (5) примет вид [6]:

$$E_{\{x,y\}}^D(x_D, y_D) = \text{const} \int dx_T dy_T \frac{\{x_T, y_T\}}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2}} K_1 \left(\sqrt{x_T^2 + y_T^2} \right) \times \quad (6)$$

$$\times \exp \left[i \frac{x_T^2 + y_T^2}{4\pi R} \right] \cdot 4 \frac{\sin \left[x_m \left(x_T + \frac{x_D}{M} \right) \right]}{x_T + \frac{x_D}{M}} \cdot \frac{\sin \left[y_m \left(y_T + \frac{y_D}{M} \right) \right]}{y_T + \frac{y_D}{M}}.$$

Используя полученное выражение, можно получить графики для реальной и мнимой части поля переходного излучения и оценить их вклад в интенсивность излучения (см. рис. 5).

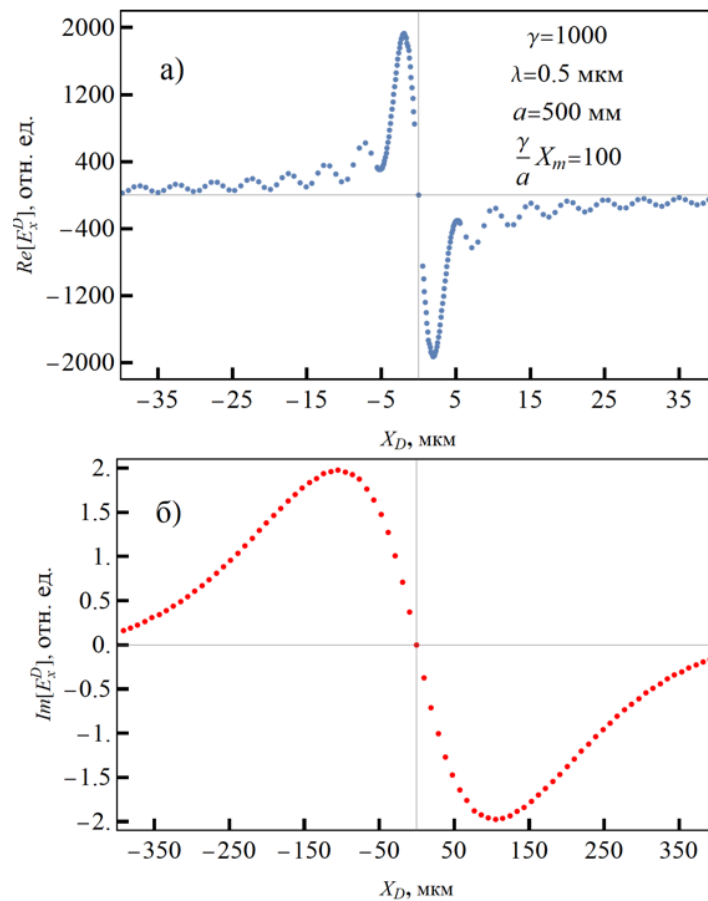


Рисунок 5 – Реальная (а) и мнимая (б) части поля оптического переходного излучения в плоскости детектора.

Видно, что основной вклад в интенсивность будет вносить реальная часть поля, так её амплитуда в тысячу раз больше амплитуды мнимой части, а значит, при расчёте интенсивности можно пренебречь вкладом мнимой части.

На рисунке (6) можно проследить влияние апертуры линзы на поле переходного излучения на детекторе.

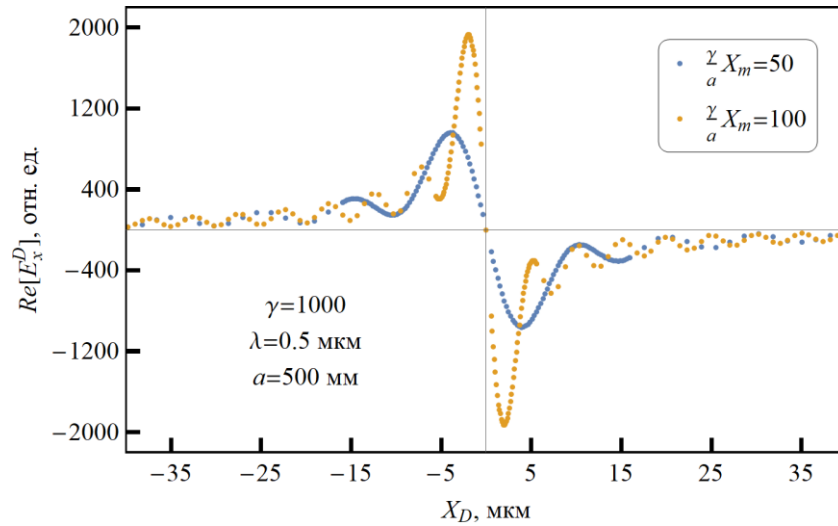


Рисунок 6 – Реальная часть поля оптического переходного излучения в плоскости детектора для двух различных апертур линзы ($X_m = 25, 50$ мм).

Как можно заметить, при уменьшении апертуры линзы вдвое ширина распределения реальной части поля увеличилась в два раза, а его амплитуда примерно в два раза уменьшилась. Данная зависимость связана с тем, что чем больше апертура линзы, тем лучше её фокусирующая способность или чем меньше апертура линзы, тем сильнее дифрагирует проходящее через нее излучение [7].

Используя следующее выражение для определения распределения интенсивности переходного излучения в плоскости детектора [6]:

$$\frac{d^2 W_{\{x,y\}}^D}{dx_D dy_D} = \text{const} |E_{\{x,y\}}^D(x_D, y_D)|^2 \quad (7)$$

можно оценить вклад фокусировки линзы на получающиеся в результате изображения при расположении линзы в ближней и дальней волновой зоне.

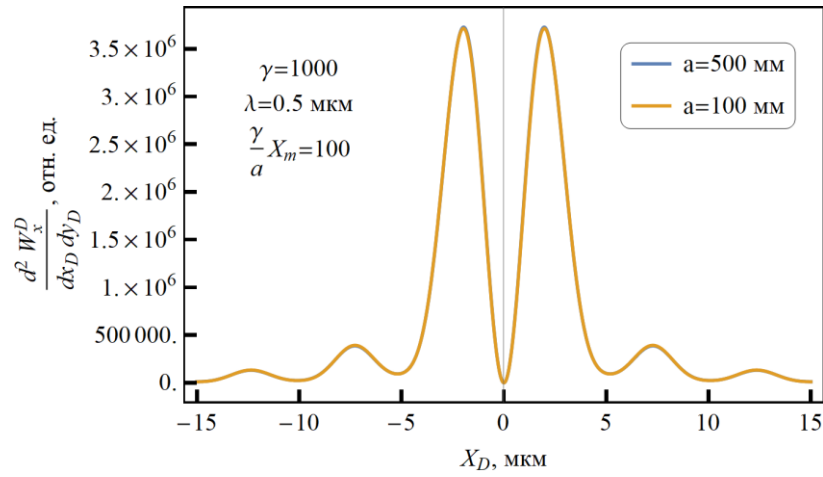


Рисунок 7 – Сравнение распределений интенсивности оптического переходного излучения от единичного электрона на детекторе для положений фокусирующей линзы в ближней и дальней волновых зонах.

Приведенные выше графики ясно иллюстрируют то, как линза, благодаря своей фокусирующей способности, нивелирует влияние конечных размеров источника на формирование картин распределения интенсивности переходного излучения в плоскости детектора.

До сих пор рассматривалось поле переходного излучения от единичного электрона, падающего в центр мишени. Но когда мы имеем дело с пучком конечных размеров, необходимо помнить, что каждый электрон в пучке падает на мишень с определенным смещением от её центра, который обычно задаётся осью оптической системы. При этом поле переходного излучения отдаленных от центра электронов может зависеть от расстояния до этого центра. Для учета смещения электрона от центра мишени выражение (6) необходимо дополнить следующим образом [6]:

$$\begin{aligned}
 E_{\{x,y\}}^D(x_D, y_D, x_0, y_0) = & const \int dx_T dy_T \frac{\{x_T - x_0, y_T - y_0\}}{\sqrt{(x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2}} \times \\
 & \times K_1 \left(\sqrt{(x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2} \right) \times \\
 & \times \exp \left[i \frac{x_T^2 + y_T^2}{4\pi R} \right] \cdot 4 \frac{\sin \left[x_m \left(x_T + \frac{x_D}{M} \right) \right]}{x_T + \frac{x_D}{M}} \cdot \frac{\sin \left[y_m \left(y_T + \frac{y_D}{M} \right) \right]}{y_T + \frac{y_D}{M}},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $\{x_0, y_0\} = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * \{X_0, Y_0\}$ – безразмерная величина, характеризующая смещение точки падения электрона на мишень от её центра.

Интенсивность же будет определяться выражение [6]:

$$\frac{d^2 W_{\{x,y\}}^D}{dx_D dy_D} = \text{const} |E_{\{x,y\}}^D(x_D, y_D, x_0, y_0)|^2. \quad (9)$$

Для начала необходимо проверить, совпадает ли смещение электрона от центра мишени со смещением распределения интенсивности переходного излучения от центра в плоскости детектора.

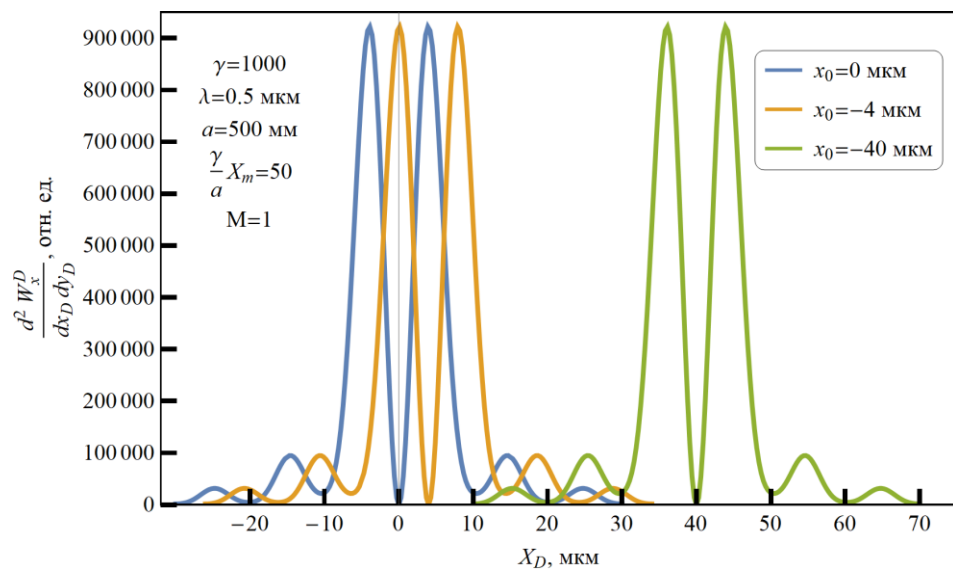


Рисунок 8 – Распределение интенсивности оптического переходного излучения от электрона с разными значениями смещения x_0 от центра мишени.

Как видно из рисунка (8), смещение распределения на детекторе по модулю равно смещению электрона от центра мишени. Разница в знаках обуславливается инвертирующим свойством линзы. Но необходимо помнить, что данный результат наблюдается только при оптическом усилении линзы равном $M = 1$. Теперь можно проверить, насколько сильно отличается форма поля при смещенном падении электрона.

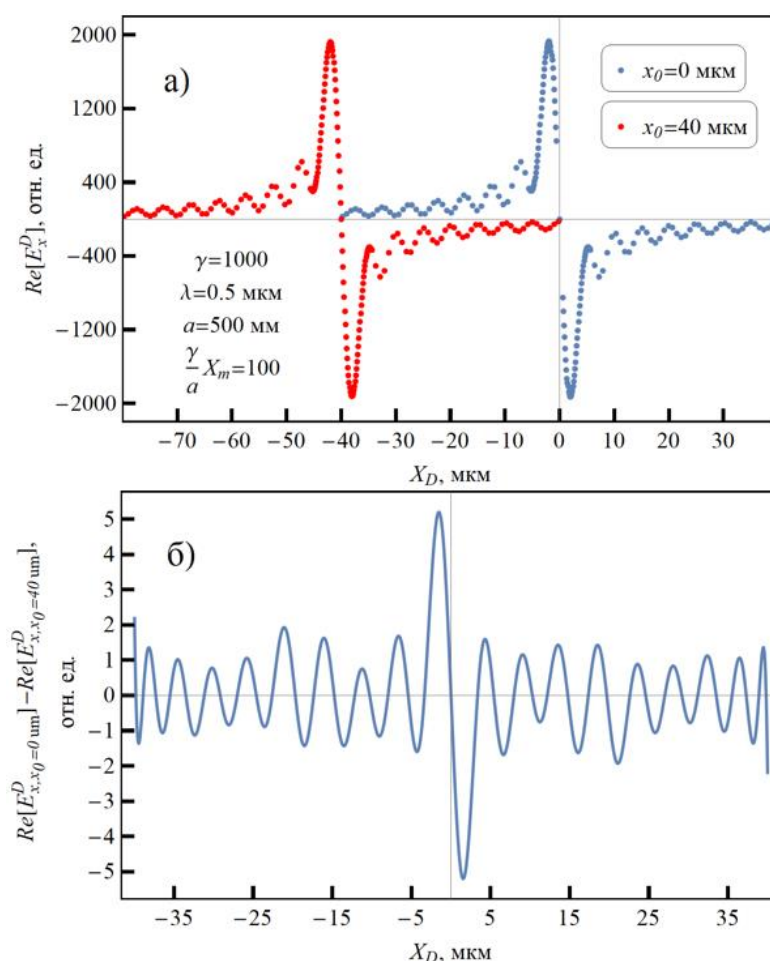


Рисунок 9 – Реальная часть поля оптического переходного излучения от электрона, падающего в центр мишени, и электрона, падающего на мишень со смещением 40 мкм от её центра (а). Разность этих полей при наложении друг на друга (б).

Из рисунка (9) видно, что форма полей переходного излучения на детекторе от электрона, падающего в центр мишени, и от электрона, падающего со смещением 40 мкм от этого центра, имеет пренебрежимо малое различие. Таким образом, можно положить, что в рассматриваемых случаях поле переходного излучения от каждого электрона имеет один общий вид и отличается только заданным смещением от центра мишени, что сводится к процессу свертки поля переходного излучения одного электрона с функцией пространственного распределения заряда в пучке для нахождения распределение

интенсивности переходного излучения от всего пучка в плоскости детектора (изображения профиля сгустка).

2 Моделирование когерентного оптического переходного излучения

Как было указано ранее, переходное излучение от пучка конечных размеров описывается следующим выражением [4]:

$$\frac{d^2 W_{\{x,y\}}(x, y, x_0, y_0)}{dxdy} = N \frac{d^2 W_{\{x,y\}}^{inc}(x, y)}{dxdy} + N(N-1) \frac{d^2 W_{\{x,y\}}^{coh}(x, y, \sigma_x, \sigma_y)}{dxdy}. \quad (10)$$

Первый член этого выражения отвечает за некогерентную часть излучения, а второй – за когерентную. Коль скоро объектом рассмотрения данной работы являются электронные пучки современных ускорителей с $N > 10^6$, некогерентная часть оптического переходного излучения которых вносит пренебрежимо маленький вклад в формирование изображения на детекторе по сравнению с когерентной частью, моделирование в данном разделе будет затрагивать исключительно когерентную часть оптического переходного излучения.

В предыдущем разделе было показано, что форма поля переходного излучения слабо зависит от смещения точки падения электрона на мишень от ее центра (в пределах рассматриваемых размеров пучка и мишени). Это позволяет использовать функцию, описывающую поле переходного излучения единичного электрона, как универсальную для всех электронов в пучке, с поправкой на их положение в нем, другими словами - с поправкой на смещение относительно центра мишени. Таким образом, можно промоделировать поле когерентного переходного излучения от всего электронного пучка, свернув эту универсальную функцию с функцией пространственного распределения заряда в пучке, которую для большинства пучков можно представить в виде Гауссова распределения [4]:

$$\rho(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z_0^2}{2\sigma_z^2} \right) \right\}, \quad (11)$$

где $\sigma_{x,y,z} = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * \Sigma_{x,y,z}$ – размер пучка по оси x, y, z в безразмерных единицах.

2.1 Угловое распределение когерентного оптического переходного излучения в дальней и ближней волновых зонах

Для начала рассмотрим формирование изображения распределения когерентного оптического переходного излучения от пучка в плоскости линзы. Это необходимо для понимания того, как формировалось бы изображение от пучка непосредственно на детекторе без фокусирующей линзы.

Поле когерентного переходного излучения от пучка электронов представляется в виде свертки дополненного учетом смещения электрона выражения (2), с выражением (11):

$$\begin{aligned} E_{coh\{x,y\}}^L(x_L, y_L, \sigma_x, \sigma_y) = & const \int dx_T dy_T dx_0 dy_0 dz_0 \times \\ & \times \rho(x_0, y_0, z_0) \frac{\{x_T - x_0, y_T - y_0\}}{\sqrt{(x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2}} \times \\ & \times K_1 \left(\sqrt{(x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2} \right) \exp \left[i \frac{x_T^2 + y_T^2}{4\pi R} \right] \cdot \exp[-i(x_T x_L + y_T y_L)]. \end{aligned} \quad (12)$$

Распределение интенсивности такого поля в плоскости линзы описывается следующим выражением:

$$\frac{d^2 W_{coh\{x,y\}}^L(x_L, y_L, \sigma_x, \sigma_y)}{dx_L dy_L} = const \left| E_{coh\{x,y\}}^L(x_L, y_L, \sigma_x, \sigma_y) \right|^2. \quad (13)$$

На рисунках (10) и (11) представлены результаты моделирования распределения интенсивности когерентного оптического переходного излучения в плоскости линзы для различных размеров электронного пучка и расстояний между мишенью и линзой.

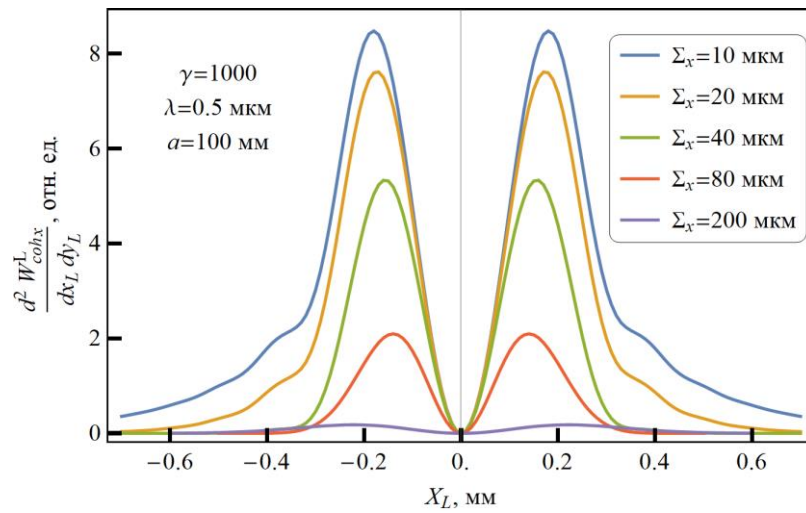


Рисунок 10 – Распределение интенсивности когерентного оптического переходного излучения от электронного пучка с поперечным размером Σ_x в плоскости линзы, расположенной в ближней волновой зоне.

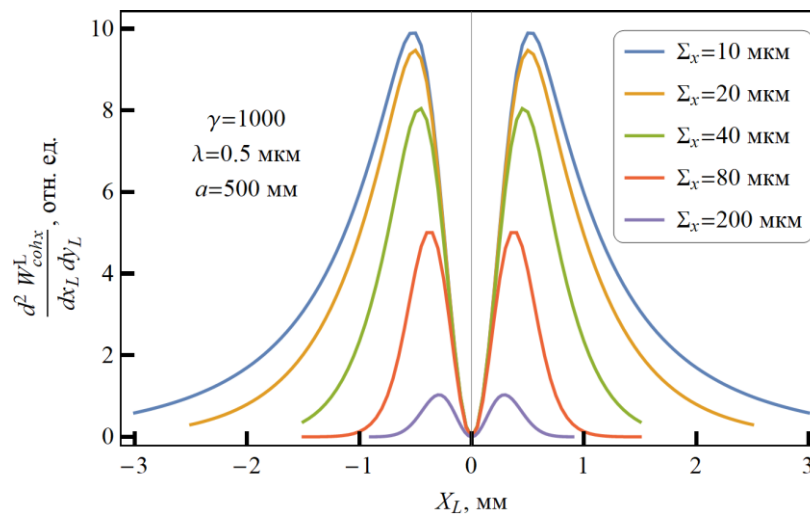


Рисунок 11 – Распределение интенсивности когерентного оптического переходного излучения от электронного пучка с поперечным размером Σ_x в плоскости линзы, расположенной в дальней волновой зоне.

Как можно заметить из приведенных выше графиков, без использования линзы на распределение интенсивности когерентного оптического переходного излучения в плоскости детектора, как и ожидалось, сильное влияние оказывает положение точки наблюдения относительно мишени, а именно область ближней волновой зоны, где сказывается влияние конечного размера источника

переходного излучения. К тому же, заметна связь между шириной распределения и поперечным размером электронного пучка, выражающаяся в сужении распределения с увеличением размера пучка. Помимо этого, интенсивность распределения так же снижается с ростом поперечного размера пучка, что может быть объяснено тем, что чем сильнее размер пучка превышает длину волны наблюдаемого переходного излучения, тем меньше становится вклад некогерентной части в формирования данного излучения.

2.2 Фокусировка когерентного оптического переходного излучения на детекторе

Распределение интенсивности когерентного оптического переходного излучения от электронного пучка в плоскости детектора, находящегося в фокусе линзы, вычисляется способом, аналогичным способу предыдущего пункта. Поле переходного излучения на детекторе для когерентного случая будет представлять из себя свертку из выражения (8) и (11):

$$E_{coh\{x,y\}}^D(x_D, y_D, \sigma_x, \sigma_y) = const \int dx_T dy_T dx_0 dy_0 dz_0 \times \\ \times \rho(x_0, y_0, z_0) \frac{\{x_T - x_0, y_T - y_0\}}{\sqrt{(x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2}} K_1 \left(\sqrt{(x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2} \right) \times \\ \times \exp \left[i \frac{x_T^2 + y_T^2}{4\pi R} \right] \cdot 4 \frac{\sin \left[x_m \left(x_T + \frac{x_D}{M} \right) \right]}{x_T + \frac{x_D}{M}} \cdot \frac{\sin \left[y_m \left(y_T + \frac{y_D}{M} \right) \right]}{y_T + \frac{y_D}{M}}. \quad (14)$$

Вычисление данного интеграла занимает продолжительное время, а потому, воспользовавшись полученными свойствами поля переходного излучения от единичного электрона из предыдущей главы, можно заменить подынтегральное выражение, отвечающее за поле переходного излучения одного электрона, на аппроксимирующее это поле функцию. Такой функцией может служить следующее выражение:

$$FSPF_{\{x,y\}}(\{x_D, y_D\} - \{x_0, y_0\}) = a_0 \{x_D, y_D\} \exp[-b_0 \{x_D, y_D\}^2] \cos(c_0 \{x_D, y_D\}) + \\ + \sum_{i=1}^n a_k \exp[-b_k \{x_D, y_D\}^2] \sin(c_k \{x_D, y_D\}). \quad (15)$$

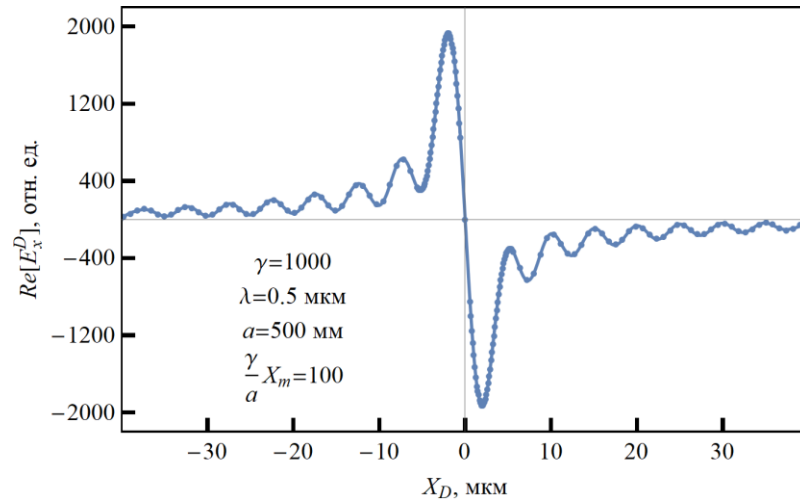


Рисунок 12 – Реальная часть поля оптического переходного излучения от единичного электрона в плоскости детектора, аппроксимированная выражением (13) с количеством членов суммы $n = 9$.

С учётом этой функции выражение (12) приобретет вид:

$$E_{coh\{x,y\}}^D(x_D, y_D, \sigma_x, \sigma_y) = const \int dx_0 dy_0 dz_0 \rho(x_0, y_0, z_0) \times \quad (16)$$

$$\times FSPF_{\{x,y\}}(\{x_D, y_D\} - \{x_0, y_0\}).$$

Интенсивность вычисляется следующим образом:

$$\frac{d^2 W_{coh\{x,y\}}^D(x_D, y_D, \sigma_x, \sigma_y)}{dx_D dy_D} = const \left| E_{coh\{x,y\}}^D(x_D, y_D, \sigma_x, \sigma_y) \right|^2. \quad (17)$$

Ниже приведены результаты расчетов распределения интенсивности по формуле (15) для двух различных значений апертур линзы.

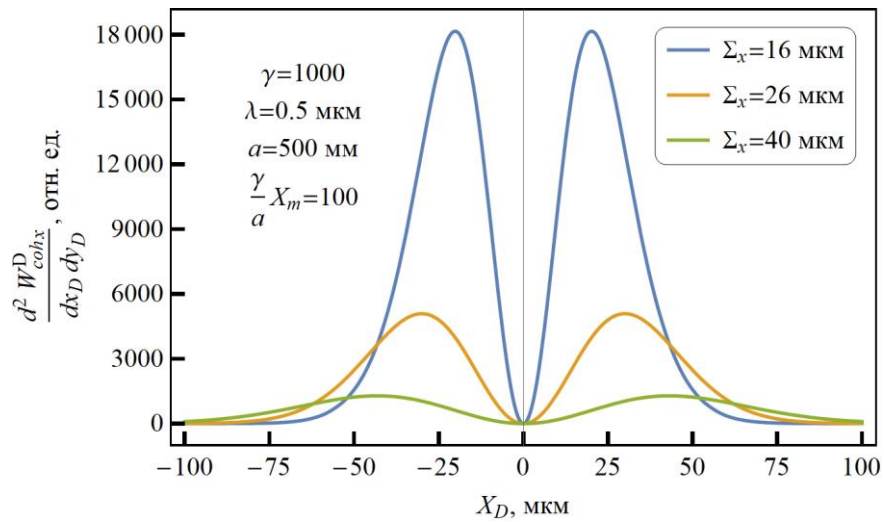


Рисунок 13 – Распределение интенсивности когерентного оптического переходного излучения от электронного пучка с поперечным размером Σ_x в плоскости детектора, находящегося в фокусе линзы размером $X_m = 50$ мм и расположенной в дальней волновой зоне.

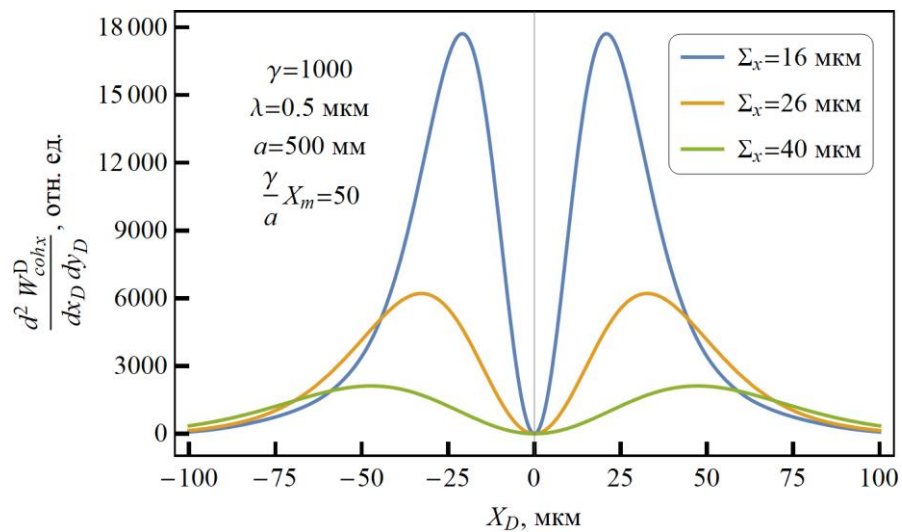


Рисунок 14. Распределение интенсивности когерентного оптического переходного излучения от электронного пучка с поперечным размером Σ_x в плоскости детектора, находящегося в фокусе линзы размером $X_m = 25$ мм и расположенной в дальней волновой зоне.

По полученным распределениям видно, что наблюдается зависимость обратная той, что имела место в предыдущем пункте с линзой: при увеличении поперечного размера электронного пучка ширина распределения его

когерентного переходного оптического излучения увеличивается. Такая обратная, по отношению к предыдущему пункту, зависимость обусловлена тем, что изображение, проходящее через линзу, инвертируется. Интенсивность распределения также снижается с ростом размера пучка. Кроме того, при внимательном рассмотрении полученных распределений можно заметить, что присутствует едва заметное различие, связанное с различными значениями апертуры линзы.

Так как речь в данной работе идёт о диагностике не только микронных электронных пучков, но и субмикронных, необходимо проверить, как размер линзы скажется на распределении когерентного переходного излучения от пучков такого размера.

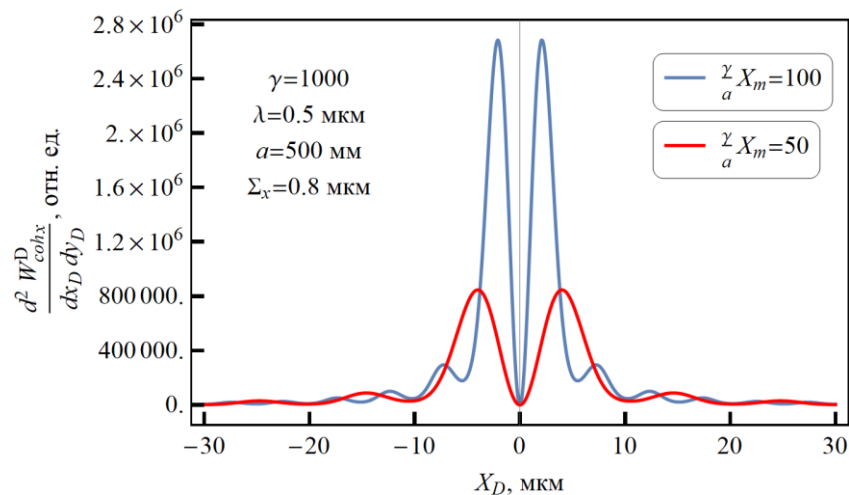


Рисунок 15 – Сравнения распределений интенсивности когерентного оптического переходного излучения от субмикронного электронного пучка при различных значениях апертуры фокусирующей линзы ($X_m = 25, 50$ мм).

Как видно из рисунка 15, влияния апертуры линзы на изображения распределения когерентного переходного излучения в плоскости детектор для субмикронных электронных пучков значительно. А это значит, что чем меньше поперечный размер пучка, тем сильнее зависит распределение излучения на детекторе от размера линзы.

По полученным распределением интенсивности когерентного оптического переходного излучения можно определить поперечный размер электронного пучка, испустившего данное излучение. Для этого достаточно определить зависимость между одним из параметров промоделированного распределения и заданным значением размера пучка. Как выяснилось из проведенного вне рамок данной работы анализе, наилучшей, а именно линейной, зависимостью обладает связь между корнем из среднего квадрата распределения, вычисленным по формуле (18), и величиной поперечного размера электронного пучка (рисунок 16, 17).

$$\sqrt{\langle X_D^2 \rangle} = \frac{\int_0^\infty dx_D \cdot x_D^2 \cdot \text{const} |E_{coh_x}^D(x_D, 0, \sigma_x)|^2}{\int_0^\infty dx_D \cdot \text{const} |E_{coh_x}^D(x_D, 0, \sigma_x)|^2} \cdot \frac{\gamma \lambda}{2\pi}. \quad (18)$$

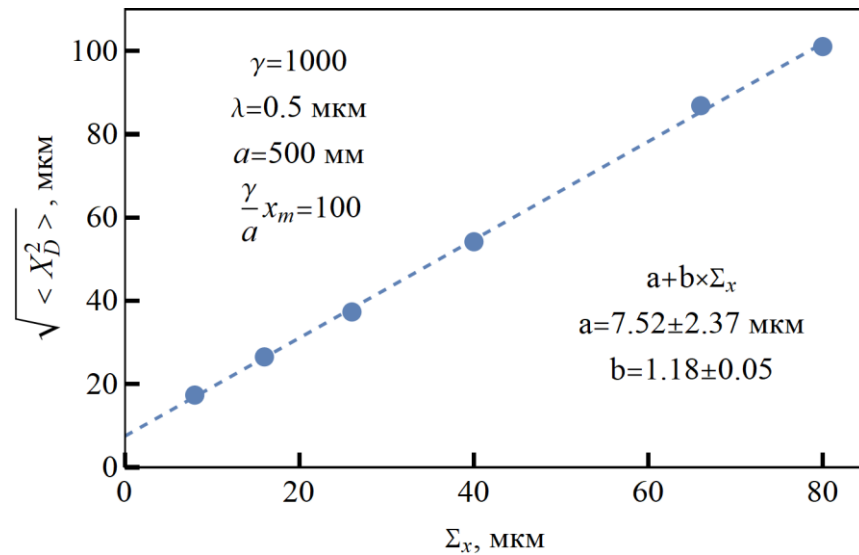


Рисунок 16 – Зависимость параметра распределения интенсивности когерентного оптического переходного излучения $\sqrt{\langle X_D^2 \rangle}$ от поперечного размера электронного пучка Σ_x при апертуре линзы равной $X_m = 50$ мм.

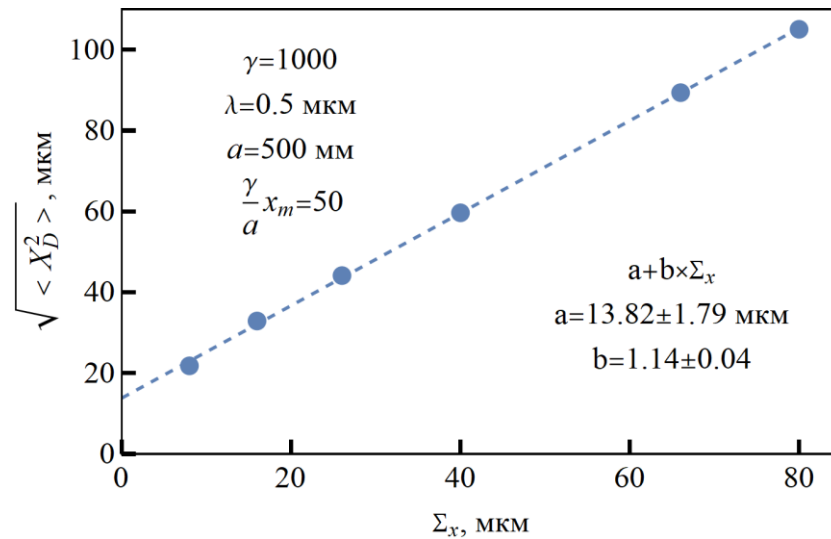


Рисунок 17 – Зависимость параметра распределения интенсивности когерентного оптического переходного излучения $\sqrt{\langle X_D^2 \rangle}$ от поперечного размера электронного пучка Σ_x при апертуре линзы равной $X_m = 25$ мм.

Используя полученные выше зависимости, можно восстановить информацию о поперечном размере электронного пучка из экспериментально полученных на детекторе распределений интенсивности когерентного переходного излучения.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результат исследования – информация о поперечном размере электронного сгустка в современных ускорителях.

Потенциальные потребители: исследовательские институты и современные ускорители электронов.

3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для её будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в табл. 1. В этой таблице сравнивается техническая ресурсоэффективность и экономическая эффективность разработки метода диагностики электронных пучков с помощью когерентного переходного излучения с другими конкурентными методами. А именно:

- Бк1 – Диагностика пучка с применением цилиндра Фарадея;
- Бк2 – Диагностика пучка с использованием люминофорных экранов.

Оценка эффективности методов диагностики электронного пучка проводилась по двум группам критериев: технические и экономические.

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы (маж 5)			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Информативность применяемой методики	0,20	5	5	3	1	1	0,6
2. Точность полученных данных о профиле пучка	0,25	4	4	2	1	1	0,5
3. Влияние на измеряемый объект	0,15	4	5	2	0,6	0,75	0,3
4. Требования к регистрирующим устройствам	0,25	4	2	3	1	0,5	0,75
5. Возможность непрерывной обработки данных	0,15	4	3	5	0,6	0,45	0,75
Итого:	1	21	19	15	4,2	3,7	2,9

Данный анализ позволяет говорить о том, что рассматриваемый в данной работе метод является одним из самых точных и информативных методов измерения профиля пучка. Кроме того, это один из немногих методов, позволяющих вести непрерывную диагностику электронного пучка. К тому же, это единственный метод, который обеспечивает наиболее точное измерения профиля пучка по когерентному переходному излучению. На данный момент он является наиболее перспективным методом измерения профиля микронных и субмикронных электронных пучков.

3.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекты.

SWOT-анализ данного научно-исследовательского проекта представлен в таблице 2.

Таблица 2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1: Отсутствие влияния на измеряемый объект С2: Высокая производительность	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1: Необходимость разработки индивидуальной схемы подключения для каждой установки
Возможности: В1: Расширение областей использования диагностики электронных пучков	1. Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей "Сильные стороны и возможности": 2. Возможность создавать недорогие схемы для диагностики с улучшенными параметрами пучка 3. Сбор и анализ полученных данных позволит усовершенствовать алгоритмы обработки результатов	1. Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей "Слабые стороны и возможности": 2. Создание типовой установки для диагностики, рассчитанных на как можно широкий спектр оборудования 3. Увеличить вычислительные мощности для обработки большего количества данных
Угрозы: У1: Отсутствие финансирования со стороны государства и частных компаний У2: Отставание исследований в смежных областях У3: Недостаток специалистов с достаточной квалификацией	1. Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей "Сильные стороны и возможности": 2. Публикация полученных данных в научном сообществе	1. Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей "Слабые стороны и угрозы": 2. Получение грантов на исследования

3.2 Планирование научно-исследовательской работы

Научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки разбиваются на этапы в соответствии с ГОСТ 15.101-98, (для НИР) ГОСТ Р 15.201-2000 (для ОКР). В зависимости от характера и сложности НИОКР ГОСТ допускает разделение этапов на отдельные виды работ

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться от 3 до 15

человек. В рамках данной работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли:

- руководитель;
- студент.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок этапов и работ при выполнении ВКР приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Выбор направления исследования	3	Разработка общей методики проведения исследований	Руководитель Инженер
	4	Выбор направления исследования	Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Инженер
Теоретические исследования	6	Анализ литературных источников	Инженер
	7	Проведение тестовых ручных расчетов	Инженер
	8	Сравнение тестовых расчетов с реальными данными	Инженер
	9	Практический расчет	Инженер
	10	Корректировка расчетов	Инженер
	11	Отчет перед руководителем	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель Инженер
	13	Составление и оформление расчетов	Руководитель Инженер
	14	Определение целесообразности проведения НИР	Руководитель Инженер
	15	Составление пояснительной записки	Инженер
	16	Подготовка к защите темы	Инженер

3.2.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5}.$$

где $t_{ожі}$, чел – дн – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы;

$t_{min.i}$, чел – дн – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств);

$t_{max.i}$, чел – дн – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств).

$$t_{ож1} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8,$$

$$t_{ож2} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 6}{5} = 4,8,$$

$$t_{ож3} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 3,8,$$

$$t_{ож4} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 2,2,$$

$$t_{ож5} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 3,8,$$

$$t_{ож6} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 6}{5} = 4,8,$$

$$\begin{aligned}
t_{\text{ож}7} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 8}{5} = 6,8, \\
t_{\text{ож}8} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8, \\
t_{\text{ож}9} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 8}{5} = 6,8, \\
t_{\text{ож}10} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8, \\
t_{\text{ож}11} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 3,8, \\
t_{\text{ож}12} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 3,8, \\
t_{\text{ож}13} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 9 + 2 \cdot 11}{5} = 9,8, \\
t_{\text{ож}14} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 5 + 2 \cdot 7}{5} = 5,8, \\
t_{\text{ож}15} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8, \\
t_{\text{ож}16} &= \frac{3t_{\text{min}.i} + 2t_{\text{max}.i}}{5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 6}{5} = 4,8.
\end{aligned}$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{q_i}.$$

где T_{pi} , раб. дн. – продолжительность одной работы;

$t_{\text{ож}i}$, чел. – дн. – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы;

$Ч_i$, чел. – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе.

Таблица 4 – Продолжительность работ в рабочих днях.

№	$t_{ож\bar{i}}$, чел-дн	$Ч_i$, чел.	T_{pi} , дней
1	2,8	1	3
2	4,8	1	5
3	3,8	2	2
4	1,8	1	2
5	3,8	1	4
6	4,8	1	5
7	6,8	1	7
8	2,8	1	3
9	6,8	1	7
10	2,8	1	3
11	3,8	1	4
12	3,8	2	2
13	9,8	2	5
14	5,8	2	3
15	2,8	1	3
16	4,8	1	5

Общая продолжительность исследования – 63 дня.

3.2.2 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \text{ кал. дн.}$$

где T_{ki} , кал. дн. – продолжительность выполнения i -й работы;

T_{pi} , раб. дн. – продолжительность выполнения i -й работы;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})} = \frac{365}{365 - (52 + 14)} = 1,22$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; 365

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; 52

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году. 14

Расчетная величина продолжительности работ T_{ki} была округлена до целых чисел. Расчетные данные сведены в таблице 5, на основании которой был построен календарный план-график.

Расчет для первой работы:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} = 3 \cdot 1,22 = 3,66 \approx 4.$$

Таблица 5 – Временные показатели проведения НИОКР

i	$t_{\min.i}$	$t_{\max.i}$	$t_{\text{ож.}i}$	$\mathcal{C}_i$	T_{pi}	T_k
1	2	4	2,8	1	3	4
2	4	6	4,8	1	5	6
3	3	5	3,8	2	2	2
4	1	3	2,2	1	2	2
5	3	5	4,8	1	4	5
6	4	6	3,8	1	5	6
7	6	8	6,8	1	7	9
8	2	4	2,8	1	3	4
9	6	8	6,8	1	7	9
10	2	4	2,2	1	3	4
11	3	5	3,8	1	4	5
12	3	5	3,8	2	2	2
13	9	11	9,8	2	5	6
14	5	7	5,8	2	3	4
15	2	4	3,8	1	3	4
16	4	6	5,8	1	5	6
Итого			71,8	-	63	78

На основе таблицы 5 строится календарный план-график. График строится разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план-график выполнения данной дипломной работы представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Календарный план-график проведения НИОКР.

п/п	Этап	Исполнитель	Тк	Продолжительность этапа												
				Март					Апрель					Май		
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Составление ТЗ	Руководитель	4	■												
2	Изучение литературы	Студент	6		■	■										
3	Разработка методики исследований	Руководитель	2			■										
		Студент														
4	Выбор направления	Руководитель	2													
		Студент														
5	Календарное план. работ	Студент	5			■	■									
6	Анализ лит. источников	Студент	6				■	■								
7	Проведение расчетов	Студент	9					■	■	■						
8	Сравнение расчетов	Студент	4						■	■						
9	Практический расчет	Студент	9							■	■	■				
10	Корректировка расчетов	Студент	4								■	■				
11	Отчет перед руководителем	Студент	5									■	■			
12	Оценка результатов	Руководитель	2										■			
		Студент												■		
13	Составление и оформление расчетов	Руководитель	6											■	■	
		Студент													■	
14	Определение целесообразности проведения НИР	Руководитель	4												■	
		Студент														■
15	Составление ПЗ	Студент	4													■
16	Подготовка к защите темы	Студент	6												■	■

3.2.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;

- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

3.2.3.1 Расчет материальных затрат НИИ

Источник финансов в данной работе – НИ ТПУ.

Затраты на программное обеспечение. Стоимость годовой лицензии Wolfram Mathematica составляет \$310,00. Курс доллара на момент покупки лицензии составляет 65,08 руб. Таким образом, стоимость покупки лицензии составляет в рублях:

$$C = 310,00 \cdot 65,08 = 20174,8 \text{ руб.}$$

Стоимость ноутбука составляет:

$$C = 35000 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления за период выполнения дипломной работы составили:

$$A = \frac{40,4 \cdot 35000,00}{1825} = 774,795 \text{ руб.}$$

где 1825 – срок службы ноутбука, дней (5 лет).

3.2.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Затраты на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИОКР, включает в себя основную заработную плату работников (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$, руб – основная заработная плата;

$З_{доп}$, руб – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата руководителя (лаборанта, инженера) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. 251

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $З_{\text{тс}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $З_{\text{тс}}$);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таким образом заработная плата руководителя за период исследования:

$$З_{\text{м}} = 23265 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 45367 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{45367 \cdot 10,4}{251} = 1880 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 1880 \cdot 17 = \mathbf{31960} \text{ руб.}$$

Заработная плата младшего научного сотрудника 1 степени за период исследования:

$$З_{\text{м}} = 14875 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 29006 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{29006 \cdot 11,2}{251} = 1294 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 1294 \cdot 58 = \mathbf{69716} \text{ руб.}$$

3.2.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 6 ч. 1 ст. 58 Закона 212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2019 году вводится пониженная ставка – 27,1% .

Страховые отчисления на исполнителей:

$$З_{\text{внеб } 1} = 0,271 \cdot 31960 = 8661,16 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{внеб } 2} = 0,271 \cdot 69716 = 18893,04 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{внеб } 1} + З_{\text{внеб } 2} = 8661,16 + 18893,04 = \mathbf{27554,2} \text{ руб}$$

3.2.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов. В данном исследовании необходимо рассчитать затраты на электроэнергию. Потребляемая мощность ноутбука 0,1 кВт/ч, время работы 41 ч. Стоимость 1 кВт/час – составляет 5,8 руб.

Таким образом, накладные расходы составляют:

$$З_{\text{накл}} = C \cdot k_{\text{нр}} = 0,1 \cdot 41 \cdot 5,8 = \mathbf{23,78 \text{ руб}},$$

где C – расходы на электроэнергию;

$k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, 16%.

3.2.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет бюджета затрат НТИ.

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	462	Пункт 5.2.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	7700	Пункт 5.2.4.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	101676	Пункт 5.2.4.3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	28469,3	Пункт 5.2.4.4
5. Накладные расходы	122	Пункт 5.2.4.5
6. Бюджет затрат НТИ	137514	Сумма ст. 1-5

Бюджет затрат НТИ составил 137514 руб.

3.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности исследования представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Безопасность	0,2	5	3
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	2
3. Помехоустойчивость	0,15	3	3
4. Энергоэффективность	0,1	3	2
5. Надежность	0,15	4	3
6. Потребность в ресурсах памяти	0,25	4	5
ИТОГО	1	-	-

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,25 = 3,95,$$

$$I_{p-исп2} = 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,25 = 3,25.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{\text{исп.}i}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}1} = \frac{I_{\text{р-исп}1}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1}} = \frac{3,95}{0,5} = 7,9,$$

$$I_{\text{исп.}2} = \frac{I_{\text{р-исп}2}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2}} = \frac{3,25}{0,73} = 4,45,$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (таблица 9).

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}} = \frac{7,9}{4,45} = 1,78.$$

Таблица 9 – Сравнительная эффективность разработки.

Пп/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,95	3,25
2	Интегральный показатель эффективности	7,9	4,45
3	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,78	

Сравнивая значения интегральных показателей эффективности, можно отметить, что более эффективным вариантом решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является исполнение 1.

В заключении можно сказать, что в результате анализа конкурентоспособности данного проекта были выявлены его преимущества и недостатки. Исследуемый в данной работе метод является одним из самых точных и перспективных методов для измерения профиля микронных и

субмикронных пучков с помощью когерентного переходного излучения. Сильные и слабые стороны проекта, а также угрозы и возможности были выявлены путём SWOT-анализа. В ходе планирования работы были разбиты на несколько этапов. Самыми продолжительными этапами оказались проведение тестовых ручных расчётов и практический расчёт, что вызвано высокой сложностью моделирования рассматриваемых физических процессов. При анализе материальных затрат было выявлено, что основные затраты пришлись на приобретение лицензии Wolfram Mathematica и ноутбука. Определены амортизационные отчисления за период выполнения дипломной работы. Рассмотрены затраты ТПУ на оплату зарплаты научному руководителю и младшему научному сотруднику. Были рассмотрены отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы, которые состояли полностью из затрат на потребление электроэнергии. Бюджет затрат научно-исследовательского проекта оценен в 137514 рублей. Проведена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Была вычислена сравнительная эффективность проекта. По результатам исследований можно сделать вывод, что проект готов к реализации и демонстрирует свою финансовую, социальную и ресурсоэффективность.

4 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда (Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ) [8].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [8], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Опасные и вредные факторы, сформированные производственным процессом, приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Обработка результатов измерений на ПК	Электромагнитное излучение, шум, вибрация	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
		Пожароопасность	ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации

При проведении исследования и обработке результатов измерений на ПК на студента воздействуют следующие факторы:

- физические:
 - температура и влажность воздуха;
 - шум;
 - статическое электричество;
 - электромагнитное поле низкой частоты;
 - освещённость;
 - наличие излучения;
- психофизиологические

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-

психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПК.

4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

4.2.2 Организация рабочего места оператора ПК

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как на рисунке 18.

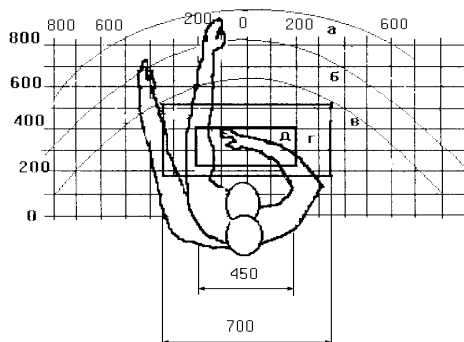


Рисунок 18 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: *дисплей* размещается в зоне а (в центре); *клавиатура* – в зоне г/д; *системный блок* размещается в зоне б (слева); *принтер* находится в зоне а (справа); *документация*: в зоне легкой досягаемости ладони - в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

1) Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

2) Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину

поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

3) Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

4) Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

5) При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветовые оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [8] и приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная	Скорость движения
Холодный и	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран (ЖК-монитор) и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [9] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц – 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц – 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- 1) увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- 2) применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

4.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с

ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства.

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава.

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта.

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся непроизвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения.

Причинами смерти от воздействия электрического тока могут быть остановка сердца или его фибрилляция. Фибрилляция (от лат. *fibra* - волокно) – хаотическое сокращение отдельных волокон сердечной мышцы, не способное поддерживать его эффективную работу и самостоятельно (без энергичных лечебных мер) не проходящее, прекращение дыхания и электрический шок – своеобразная нервно-рефлекторная реакция организма в ответ на сильное раздражение электрическим током, сопровождающаяся расстройством кровообращения, дыхания, обмена веществ и т.д. Шоковое состояние может продолжаться от нескольких десятков минут до суток. При длительном шоковом состоянии может наступить смерть.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы.
- вывешивание плакатов, указывающих место работы
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод.
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электро-поражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

4.5 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [10] в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС (112).
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

В данной работе было исследовано угловое распределение когерентного переходного излучения в дальней и ближней волновой зоне, его зависимость от поперечного размера пучка и влияние линзы на распределение излучения в плоскости детектора при положении линзы как в ближней, так и в дальней волновой зоне. В результате была получена линейная зависимость, связывающая размеры изображения сгустка на детекторе с реальным поперечным размером сгустка.

В заключении можно подвести некоторые результаты:

- Промоделировано распределение интенсивности оптического переходного излучения от одного электрона, падающего на наклоненную под 45° к траектории пучка идеальную металлическую мишень, в плоскости линзы и детектора, расположенного в фокусе данной линзы.
- Определена зависимость полученных распределений от размеров линзы.
- Оценен вклад реальной и мнимой части поля оптического переходного излучения в формирование распределения интенсивности на детекторе.
- Определено, что смещение минимума распределения от центра детектора равно смещению электрона от центра мишени при падении на неё, только при условии, что оптическое усиление линзы равно одному.
- Оценено различие между формами полей переходного излучения на детекторе от электрона, упавшего в центр мишени, и электрона, пересекшего мишень в точке, смещенной от её центра.
- Рассмотрено распределение интенсивности когерентного оптического переходного излучения от пучка электронов

конечного поперечного размера в плоскости линзы как в дальней, так и в ближней волновой зоне.

- Рассмотрена фокусировка когерентного оптического переходного излучения от пучка с конечным поперечным размером на детекторе при использовании линз различного размера.
- Определено, что фокусировка излучения от субмикронных электронных пучков наиболее чувствительна к изменению размеров линзы.
- По полученным распределениям когерентного оптического переходного излучения установлена зависимость между их параметром и поперечным размером электронного пучка, индуцировавшего это излучение.

Список использованных источников

1. Денисов, П.И. Переходное излучение / П.И. Денисов // Соросовский образовательный журнал. – 1997. - № 3. – С. 124-129.
2. V.A. Verzilov, Transition radiation in the pre-wave zone // Physics Letters A 273, 1-2, 135-140 (2000).
3. G. Kube, “Imaging with optical transition radiation, transverse beam diagnostics for the xfel,” TESLA-FEL Report, vol. 1, p. 2008, 2008.
4. Потылицын А. П. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. С. 762.
5. Kube, Gero & Alexander, Potylitsyn. (2018). Coherent backward transition radiation from sub-fs “pancake-like” bunches as a tool for beam diagnostics. Journal of Instrumentation. 13. C02055-C02055. 10.1088/1748-0221/13/02/C02055.
6. Potylitsyn A., “Image of Optical Diffraction Radiation (Odr) Source and Spatial Resolution of Odr Beam Profile Monitor”, *Advanced Radiation Sources and Applications*, NATO Science Series, Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, 199, ed. Wiedemann H., Springer, 2006, 149–163.
7. Xiang, Dao & Huang, Wen-Hui. (2007). Theoretical considerations on imaging of micron size electron beam with optical transition radiation. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment - NUCL INSTRUM METH PHYS RES A. 570. 357-364. 10.1016/j.nima.2006.10.175.
8. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ
9. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
10. ГОСТ Р12.1.004-85. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. Пожарная безопасность. – М. Стандартинформ, 1985. – 10с.