

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа ИЯТШ

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) ОЯТЦ

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОГЕРЕНТНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР</b>

УДК 539.26:621.384.6:535.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4Б	Котляров Артем Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Сухих Л.Г.	к.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

### *Планируемые результаты обучения*

Код результата	Результат обучения (компетенции)
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P1	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.
P2	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.
P3	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.
P4	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.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	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.

<i>Профессиональные компетенции</i>	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	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).
P9	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.
P10	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.
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 разработке 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 образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИЯТШ  
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) ОЯТЦ

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      Бычков П.Н.  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0А4Б	Котлярову Артему Юрьевичу

Тема работы:

Исследование спектральных свойств когерентного дифракционного излучения от периодических структур	
Утверждена приказом директора	от 28.03.2018 № 2199/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2018
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Экспериментальные данные по наблюдению дифракционного излучения; схема эксперимента.
<b>Перечень подлежащих к исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Обзор литературных источников по теме исследования; освоение программного обеспечения; программная реализация алгоритма обработки результатов эксперимента; тестирование алгоритма; обработка результатов эксперимента; определение зависимости спектра дифракционного излучения от угла ориентации решетки; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН, к.ф.н. Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	Ассистент ОЯТЦ, к.ф.-м.н. Гоголева Т.С.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	01.04.2018
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ИШФВП	Сухих Л.Г.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А4Б	Котляров Артем Юрьевич		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа ИЯТШ

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Уровень образования Бакалавр

Отделение школы (НОЦ) ОЯТЦ

Период выполнения Весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.04.18	Составление и утверждение технического задания	5
08.04.18	Подбор и изучение литературы по теме исследования	5
18.04.18	Освоение программного обеспечения	5
22.04.18	Создание и программная реализация алгоритма обработки результатов эксперимента	35
13.05.18	Проведение расчетов	10
21.05.18	Проверка и анализ полученных результатов	30
30.05.18	Подготовка в защите ВКР	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Сухих Л.Г.	к.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

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

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А4Б	Котлярову Артему Юрьевичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯШТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования:	— заработная плата – 48019 руб.; — бюджет исследования – 62300 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов:	— тариф на электроэнергию 5,8 руб./кВт·ч; — районный коэффициент для г. Томска равен 1,3.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования:	— отчисления во внебюджетные фонды 27,1%.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Планирование и формирование бюджета научных исследований:	— структура работ в рамках научно-технического исследования; — оценка трудоемкости выполнения работ; — составление графика выполнения научно-технического исследования; — расчет бюджета научно-технического исследования.
--	---

**Перечень графического материала:**

1. Матрица SWOT-анализа; 2. Диаграмма Ганта; 3. Этапы проведения работ; 4. Бюджет затрат научно-технического исследования.
---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	10.05.2018
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А4Б	Котляров Артем Юрьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А4Б	Котлярову Артему Юрьевичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯШТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>— вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, ионизирующее излучение);</li> <li>— опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме:	<ul style="list-style-type: none"> <li>— электробезопасность;</li> <li>— пожаровзрывобезопасность;</li> <li>— требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> </ul>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>— действие фактора на организм человека;</li> <li>— приведение допустимых норм с необходимой размерностью;</li> <li>— предлагаемые средства защиты.</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>— электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>— пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	30.04.2018
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А4Б	Котляров Артем Юрьевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 64 с., 13 рисунков, 16 таблиц, 22 источника.

Ключевые слова: Фурье-спектроскопия, дискретное преобразование Фурье, дифракционное излучение, источники ТГц излучения, Wolfram Mathematica.

Объектом исследования является дифракционное излучение от решетки.

Цель работы – обработка и анализ экспериментальных данных, полученных в ходе экспериментов по исследованию спектральных свойств дифракционного излучения в ТГц диапазоне.

В процессе исследования проводилась математическая обработка экспериментальных данных с использованием предложенного алгоритма в программной среде Wolfram Mathematica.

В результате исследования было сделано заключение о работоспособности реализованного алгоритма при сравнении полученных спектральных характеристик дифракционного излучения с теоретически рассчитанными.

Степень внедрения: на данный момент предмет исследования находится на стадии теоретической проработки.

Область применения: источники ТГц излучения, диагностика пучков заряженных частиц.

Экономическая эффективность работы в настоящий момент не может быть установлена, поскольку предмет исследования находится на стадии теоретической проработки.

## Оглавление

Введение.....	13
1 Эксперимент по исследованию свойств дифракционного излучения.....	15
2 Математические основы Фурье-спектроскопии.....	18
3 Алгоритм обработки интерферограммы.....	21
4 Проблемы обработки интерферограммы.....	24
4.1 Влияние ограниченной длины интерферограммы на спектр.....	25
4.2 Эффект частотола.....	27
4.3 Неравномерная запись интерферограммы.....	29
5 Статистическое моделирование.....	31
6 Анализ результатов.....	34
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	37
7.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	38
7.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	38
7.1.2 SWOT-анализ.....	38
7.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	41
7.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	41
7.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	42
7.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	43
7.2.4 Бюджет научно-технического исследования.....	46
8 Социальная ответственность.....	50
8.1 Анализ опасных и вредных факторов.....	51
8.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	52

8.2.1 Организационные мероприятия .....	52
8.2.2 Технические мероприятия .....	52
8.2.3 Условия безопасной работы .....	55
8.3 Электробезопасность .....	57
8.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	58
Заключение .....	61
Список используемых источников.....	62

## Введение

При пролете электрона вблизи поверхности вещества, кулоновское поле возбуждает колебания электронов в атоме, то есть возникают поляризационные токи, являющиеся источником вторичного электромагнитного поля, называемого поляризационным излучением. К поляризационному излучению относится переходное излучение (ПИ) и дифракционное излучение (ДИ) [1].

Интенсивность дифракционного излучения релятивистских частиц в оптическом и ультрафиолетовом диапазоне может быть сравнима с интенсивностью переходного излучения, которое широко используется в физике высоких энергий и ускорительной физике. В отличие от переходного, дифракционное излучение не сопровождается непосредственным взаимодействием частиц пучка с твёрдой мишенью, что открывает перспективы невозмущающей диагностики пучков на современных ускорителях [2].

Другой перспективной областью применения дифракционного излучения является создание источников ТГц излучения. Необходимость в источниках ТГц излучения обусловлена тем, что в данной области частот плохо работают как радиофизические методы (со стороны длинных волн), так и оптические (со стороны коротких волн). Выбор дифракционного излучения в качестве терагерцового источника обусловлен спектральными особенностями излучения:

- монохроматичность линий спектра;
- возможность осуществления спектральной перенастройки линий;
- малое отличие ширины спектральной линии дифракционного излучения от ширины линии излучения Смита-Парселла.

Целью данной работы является обработка и анализ экспериментальных данных, полученных в ходе экспериментов на ускорителе КЕК-LUCX (г. Цукуба, Япония) по исследованию спектральных свойств дифракционного излучения в ТГц диапазоне.

Задачи, которые необходимо выполнить для достижения цели:

- создание и реализация в программной среде Wolfram Mathematica алгоритма математической обработки экспериментальных данных;
- восстановление экспериментальных спектров излучения;
- провести сравнение полученных спектральных характеристик с теоретически рассчитанными.

## 1 Эксперимент по исследованию свойств дифракционного излучения

Дифракционное излучение, возникающее при параллельном движении заряженной частицы с постоянной скоростью вблизи периодической структуры, называется излучением Смита-Парселла, в честь ученых, впервые экспериментально наблюдавших данное явление [3]. Однако, на возможность существования данного явления впервые обратил внимание И.М. Франк, который в своей работе [4] получил формулу для длины волны излучения:

$$\lambda = d \left( \frac{1}{\beta} - \cos \theta \right), \quad (1)$$

где  $d$  – период решетки;  $\beta$  – скорость частицы в единицах скорости света;  $\theta$  – угол наблюдения.

Из приведенного дисперсионного соотношения (1) следует, что для фиксированного угла наблюдения положение линии в спектре определяется только периодом решетки и энергией частицы. Для того чтобы регулировать длину волны излучения, необходимо изменять либо угол наблюдения, либо период решетки, что не всегда осуществимо. Для осуществления сдвига линии в работах [5, 6] предлагалось использовать непараллельную ориентацию решетки относительно импульса электрона при фиксированном угле наблюдения. Также в работе [6] из фазовых соотношений было получено обобщенное дисперсионное соотношение в случае наклонной ориентации решетки:

$$\lambda_k = \frac{d}{k} \left( \frac{\cos \eta}{\beta} - \cos(\theta - \eta) \right), \quad (2)$$

где  $k$  – порядок дифракции;  $\eta$  – угол ориентации решетки относительно импульса электрона.

Излучение, испускаемое при движении заряженной частицы над плоскостью наклонной решетки (рисунок 1), называется дифракционным излучением от решетки (grating diffraction radiation, GDR).

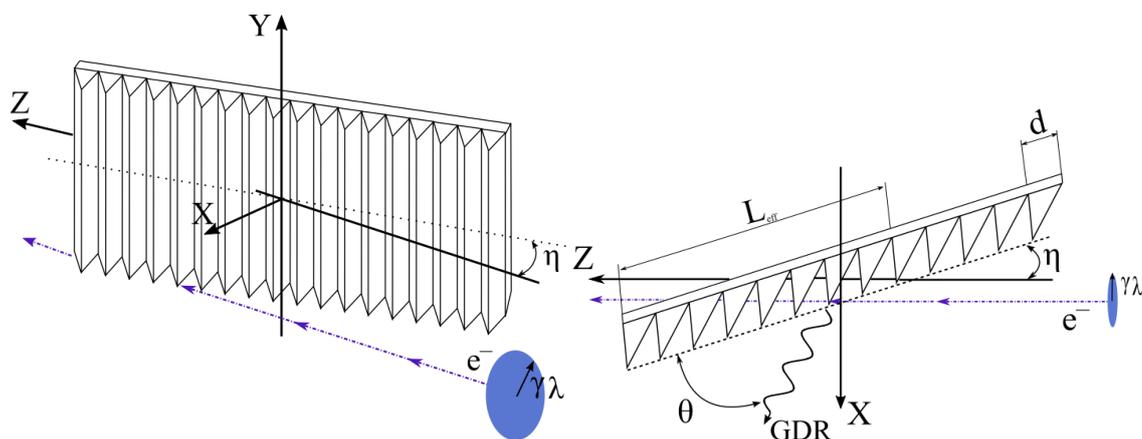


Рисунок 1 – Геометрия генерации дифракционного излучения на решетке

Кулоновское поле релятивистского заряда с поперечным размером  $\gamma\lambda$  взаимодействует с решеткой, наклоненной под углом  $\eta$ , на длине

$$L_{eff} = \frac{\gamma\lambda}{\sin\eta}. \quad (3)$$

Если выполняется соотношение

$$N_{eff} = \frac{L_{eff}}{d} \gg 1, \quad (4)$$

то монохроматичность спектральной линии можно оценить из следующего соотношения [7]:

$$\Delta\lambda_k/\lambda_k \approx \frac{1}{kN_{eff}}. \quad (5)$$

Оценка монохроматичности линии по приведенному выше условию справедлива только в том случае, если выполняется условие

$$N \geq N_{eff}, \quad (6)$$

где  $N$  – количество периодов решетки.

На ускорителе КЕК LUCX [8] проводились эксперименты по исследованию спектров излучения, а также поляризационных свойств дифракционного излучения от решетки. Эксперимент проводился на пучке электронов со следующими параметрами (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры пучка электронов

Энергия электронов	8 МэВ
Ток пучка	25 пА
Длина сгустка	0,5 пс
Диаметр	230 мкм
Нормализованный эмиттанс	4,7-6,5 мм·мрад

Схема эксперимента представлена на рисунке 2.

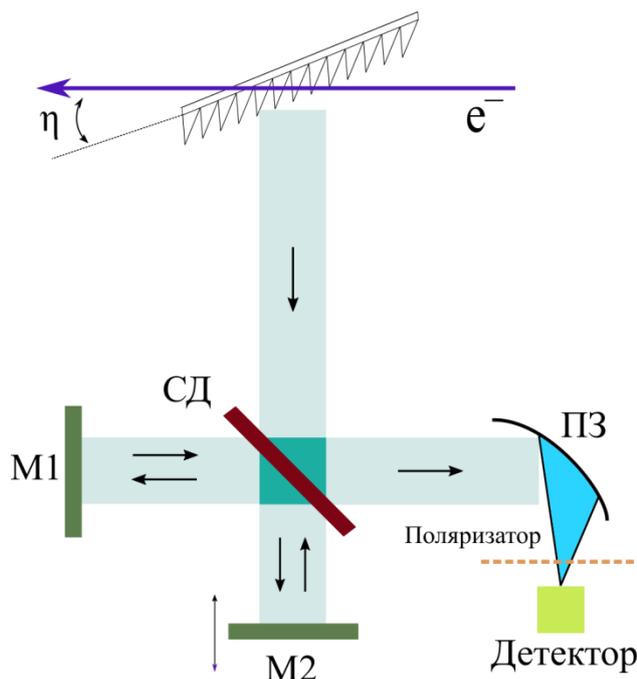


Рисунок 2 – Схема эксперимента: M1 – неподвижное зеркало, M2 – подвижное зеркало, СД – светоделитель, ПЗ – параболическое зеркало

Спектральные измерения проводились с помощью интерферометра Майкельсона [9]. Излучение детектировалось с помощью барьерного диода Шоттки (SBD 320-460) с полосой чувствительности 320-460 ГГц. В качестве поляризатора использовалась вольфрамовая проволочная сетка диаметром 15 мкм, установленная напротив диода Шоттки на расстоянии 200 мкм.

Конечным результатом эксперимента является запись интерферограммы. Для восстановления спектров излучения, необходимо выполнить математическую обработку полученных интерферограмм. С этой целью был предложен и программно реализован алгоритм обработки результатов эксперимента. Далее подробнее рассмотрим математические особенности обработки интерферограмм, а также структуру предложенного алгоритма.

## 2 Математические основы Фурье-спектроскопии

Рассмотрим процедуру формирования Фурье-спектрометром спектра излучения источника в оптически идеальном случае при неограниченном перемещении подвижного зеркала. Падающее на идеальный светоделитель монохроматическое излучение делится на две равные по амплитуде световые волны. В зависимости от оптической разности хода между ними попадающее на фотоприемник излучение либо усиливается, либо ослабляется. Пусть одно из зеркал перемещается с нормальной к его поверхности постоянной скоростью  $\bar{u}$  вдоль оптической оси прибора. Тогда через изображение точечного источника в выходной фокальной плоскости прибора проходит переменный поток излучения  $S_{\phi\Pi}(\Delta)$ , описываемый формулой двухлучевой интерференции [10]

$$S_{\phi\Pi}(\Delta) = \frac{S_{\sigma_0}}{2} + \frac{S_{\sigma_0}}{2} \text{Cos}(2\pi\sigma\Delta) = \frac{1}{2}S_{\sigma_0} + \frac{1}{2}A_{\sigma}(\Delta), \quad (7)$$

где  $S_{\sigma_0}$  – поток монохроматического излучения на входе интерферометра;  $\Delta(t)$  – оптическая разность хода интерферирующих волн, линейно зависящая от времени.

Второе слагаемое в формуле (7) изменяется с изменением оптической разности хода, а значит, и со временем [11]:

$$A_{\sigma}(\Delta) = A_0 \text{Cos}(2\pi\sigma\Delta) = A_0 \text{Cos}(2\pi f t) = \hat{A}_{\sigma}(t), \quad (8)$$

где  $A_0$  – амплитуда модуляции;  $f = \sigma\Delta/t$  – частота модуляции сигнала на выходе интерферометра.

Каждому монохроматическому излучению с волновым числом  $\sigma$  соответствует своя интерференционная косиноида. Сигнал, регистрируемый фотоприемником Фурье-спектрометра, представляет собой интерферограмму. Интерферограммой будем называть переменную функцию  $A(\Delta)$ , которая имеет вид [12]

$$A(\Delta) = \int_0^{\infty} S_{\sigma_0}(\sigma) \text{Cos}(2\pi\sigma\Delta) d\sigma, \quad (9)$$

Таким образом, интерферограмма вида (9) представляет собой косинус-преобразование Фурье, или Фурье-образ, спектра излучения источника

$S_{\sigma_0}(\sigma)$ . Детектором непосредственно регистрируется не реальный спектр, а его Фурье-образ.

Рассмотрим подробнее процедуру преобразования. В общем случае функция  $F(x)$ , удовлетворяющая условию Дирихле [13] на любом конечном отрезке и такая, что интеграл от её модуля в бесконечных пределах сходится, может быть записана в виде

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \exp(iyx) dy, \quad (10)$$

Выражение в правой части (10) называется интегралом Фурье функции  $F(x)$ . Подынтегральная функция  $f(y)$  называется Фурье-образом функции  $F(x)$ , а переменные  $x$  и  $y$  – сопряженными параметрами.

Возьмем в качестве переменных оптическую разность хода  $\Delta$  и волновое число  $\sigma$ , перейдем к исходным обозначениям функций и установим соответствие между математически восстанавливаемым из интерферограммы спектром  $S_{\sigma_0}^B$  и истинным спектром  $S_{\sigma_0}$ . Функция  $A(\Delta)$  не зависит от знака оптической разности хода и является действительной четной функцией, симметричной относительно  $\Delta = 0$ . Восстанавливаемый спектр можно получить с помощью косинус-преобразования Фурье [14]:

$$S_{\sigma_0}^B = \int_{-\infty}^{\infty} A(\Delta) \text{Cos}(2\pi\sigma\Delta) d\Delta. \quad (11)$$

Математически восстановленная функция  $S_{\sigma_0}^B$  является действительной и четной. Обратное Фурье-преобразование такой функции  $S_{\sigma_0}^B$  должно приводить к исходной интерферограмме:

$$A(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\sigma_0}^B \text{Cos}(2\pi\sigma\Delta) d\sigma. \quad (12)$$

Сравнивая выражения (9) и (12), приходим к следующей связи между  $S_{\sigma_0}^B$  и  $S_{\sigma_0}$ :

$$A(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\sigma_0}^B \text{Cos}(2\pi\sigma\Delta) d\sigma = \int_0^{\infty} S_{\sigma_0}(\sigma) \text{Cos}(2\pi\sigma\Delta) d\sigma. \quad (13)$$

Истинный спектр  $S_{\sigma_0}$  определен только для реально существующих положительных волновых чисел, а для отрицательных он равен нулю, в то

время как Фурье-преобразование интерферограммы (12) формирует спектр  $S_{\sigma_0}^B$  также и в области отрицательных волновых чисел.

Восстановленный Фурье-преобразованием спектр  $S_{\sigma_0}^B$  есть не что иное как четная часть истинного спектра. Значения восстановленного спектра в два раза меньше соответствующих значений истинного спектра при имеющих физический смысл положительных волновых числах  $\sigma$ , а в области отрицательных волновых чисел восстановленный спектр имеет симметричные относительно нулевого волнового числа значения.

Разность хода в конкретном интерферометре может принимать как отрицательные, так и положительные значения, но вследствие четности интерферограммы  $A(\Delta)$  достаточно знать ее вид при положительных значениях  $\Delta$ . Интерферограмма, измеренная при  $\Delta > 0$ , называется односторонней. Нулевую разность хода в этом случае обычно определяют путем регистрации односторонней интерферограммы с небольшим отрицательным смещением.

Приведенная выше теория справедлива лишь в том случае, если интерферограмма задана аналитически. На практике получают оцифрованную интерферограмму в виде двумерного массива  $A(\Delta)$ , которая преобразуется в спектр посредством математической операции, именуемой дискретным преобразованием Фурье (ДФП). Основное уравнение ДФП имеет следующий вид [15]:

$$S(k\Delta\sigma) = C \sum_{n=0}^{N-1} A(n\delta\Delta) \exp\left(-\frac{i2\pi k n}{N}\right). \quad (14)$$

Спектральный интервал дискретизации  $\Delta\sigma$  связан с  $\delta\Delta$  соотношением:

$$\Delta\sigma = 1/(N\delta\Delta). \quad (15)$$

ДФП представляет заданную функцию как суперпозицию синусов и косинусов. Получаемая в результате функция  $S(k\Delta\sigma)$  представляет собой набор коэффициентов Фурье этого разложения.

### 3 Алгоритм обработки интерферограммы

Выходной файл результатов представляет собой массив данных, состоящий из набора значений сигнала и тока детектора, записанных при различных положениях подвижного зеркала. В каждом положении зеркала сигнал, и, соответственно, ток, записывается в среднем 10 раз для увеличения отношения сигнал/шум. За счет этого размер конечного файла значительно увеличивается, что приводит к необходимости автоматической обработки результатов. Для этой цели будем использовать программную среду Wolfram Mathematica. Математические функции, необходимые для выполнения преобразований Фурье, встроены внутрь программы. Таким образом, остается только подготовить интерферограмму к преобразованиям Фурье. Для этого был реализован следующий алгоритм действий:

- 1) импортируем исходные данные в программу;
- 2) нормируем значения сигнала;
- 3) усредняем значения сигнала;
- 4) совмещаем максимальную интенсивность с нулевой разностью хода;
- 5) интерполируем интерферограмму;
- 6) применяем аподизацию;
- 7) добавляем нули к исходному массиву;
- 8) выполняется Фурье-преобразование полученного массива;
- 9) аппроксимация функцией Гаусса.

На первоначальном этапе из выходного файла результатов в программу импортируем значения сигнала и тока детектора, а также значение пьедестала (количество отчётов аналого-цифрового преобразователя при отсутствии входного сигнала) для каждого из них. Для этого из каждой строки выделяем по одному значению сигнала и тока. После этого формируем два массива: первый массив содержит все значения сигнала, а второй – соответствующие значения

тока детектора. Кроме этого, формируем дополнительный массив со значениями положений зеркала, необходимый для дальнейших преобразований.

Для дальнейших преобразований необходимо нормировать значения сигнала. Нормировка результатов осуществляется следующим образом: значение сигнала нормируется на соответствующее ему значение тока с предварительных вычитанием пьедесталов. Это можно описать при помощи формулы:

$$n = \frac{signal_i - peds}{current_i - pedc}, \quad (16)$$

где  $n$  – массив нормированных значений сигнала;  $signal_i$  –  $i$ -е значение сигнала при фиксированном положении зеркала;  $current_i$  –  $i$ -е значение тока детектора, соответствующее  $i$ -му значению сигнала;  $peds$  – пьедестал значений сигнала;  $pedc$  – пьедестал значений тока.

Как было сказано раньше, при каждом фиксированном положении зеркала измерения проводятся в среднем 10 раз. Усредняем нормированные значения сигнала по количеству измерений.

Обычно интерферограмма записывается в относительных координатах подвижного зеркала. Для корректного применения дискретного преобразования необходимо, чтобы нулевая разность хода была расположена в начале координат. Нулевая разность хода определяется в эксперименте путем регистрации односторонней интерферограммы с небольшим отрицательным смещением. Таким образом, зная значение нулевой разности хода в относительных координатах, сдвигаем интерферограмму на величину этого значения.

Далее применяем математические методы обработки интерферограмм: аподизацию и добавление нулей. Также было предложено для обработки использовать интерполяцию полиномом первого порядка. В следующей главе рассмотрим эти методы подробнее на примерах.

После выполнения всех подготовительных этапов, для окончательно сформированной интерферограммы применяем Фурье-преобразование. Получаемый в результате преобразований массив, состоит из комплексных

чисел. Для получения спектра, берется квадрат модуля Фурье-образа. Из-за свойства периодичности, присущего Фурье-преобразованию, из сформированного массива берем первую четверть значений. Далее, для оптической разности хода  $\Delta_i$  находится соответствующая ей частота  $\nu_i$  умножением на коэффициент

$$C = \frac{c}{2 \cdot step \cdot Length[Massive]}, \quad (17)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $step$  – шаг подвижного зеркала;  $Length [Massive]$  – количество элементов массива данных;

На завершающем этапе наиболее характерные пики в спектре аппроксимируются функцией Гаусса вида:

$$y = A \cdot \text{Exp} \left( -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right), \quad (18)$$

где  $A, \mu$  и  $\sigma$  – параметры аппроксимации.

Из подобранной функции (18) находится положение и ширина пика. Ширину пика вычисляться на половине высоты (FWHM) [16]. Ширина при этом связана со среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ , следующим соотношением:

$$\Delta = 2,35\sigma. \quad (19)$$

Функционал программы Wolfram Mathematica позволяет проводить аппроксимацию нескольких пиков. Для этого каждому пику подбирается своя функция аппроксимации.

## 4 Проблемы обработки интерферограммы

Перед тем как применить описанный выше алгоритм, необходимо обозначить проблемы, возникающие на начальном этапе обработки. В основном, проблемы связаны с пошаговым сканированием интерферограммы. Для перемещения зеркала используется механический привод, в работе которого наблюдаются сбои. В результате этого точки на интерферограмме располагаются неравномерно, т.е. имеется некоторый дрейф реального сдвига, относительно заданного шага перемещения. Для выполнения преобразований Фурье необходимо, чтобы точки были равноудалены друг от друга. Также во время серии измерений, при фиксированном положении зеркала, из-за малых колебаний в приводе, возникает дополнительное смещение на десятые доли микрометров. Это в свою очередь приводит к тому, что на интерферограмме появляются дополнительные точки, искажающие конечный вид спектра. В качестве возможного решения этих проблем было предложено следующее:

- 1) интерполировать интерферограмму с целью равномерного распределения точек. Это действие выполняется после этапа усреднения;
- 2) округлять значения положений зеркала до целых чисел. На рисунке 3 представлен пример, как при этом изменяется спектр.

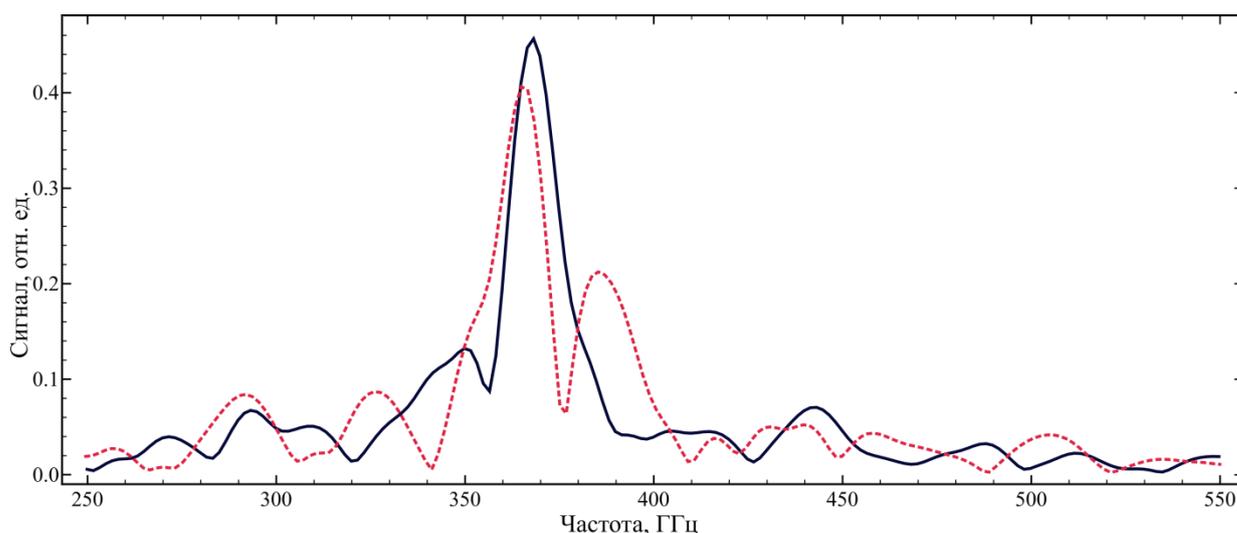


Рисунок 3 – Влияние малых колебаний положения зеркала на спектр: сплошная линия – спектр, полученный при округленных значениях положения зеркала; пунктирная линия – спектр от нескорректированных данных

Из рисунка 3 видно, что появление дополнительных точек на интерферограмме приводит к неправильной обработке. На пунктирном спектре отчетливо видно расщепление линии главного максимума, являющееся результатом наличия ошибки в исходных данных.

#### 4.1 Влияние ограниченной длины интерферограммы на спектр

Из-за ограниченного диапазона сканирования интерферограммы после обработки в спектре наблюдается появление ложных пиков (т.н. «боковые лепестки»). Для уменьшения амплитуды ложных пиков применяется математическая операция, называемая аподизацией.

Существует большое количество функций аподизации. Для исследования изменения формы спектра, рассмотрим две функции аподизации, и сравним их между собой и отсутствием аподизации:

1) треугольная функция

$$y = \left(b - \frac{|x|}{L}\right), \quad (20)$$

где  $b$  и  $L$  – параметры;

2) функция Конна

$$y = \frac{(a^2 - 4x^2)^2}{a^4}, \quad (21)$$

где  $a$  – параметр.

На рисунке 4 для сравнения представлены два спектра, полученные при помощи разных функций аподизации.

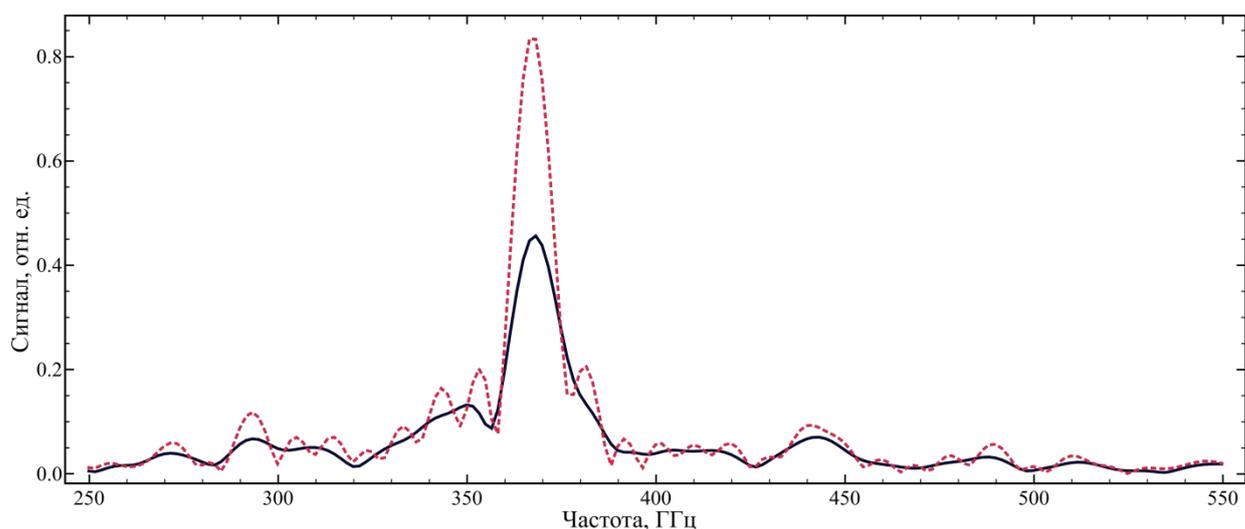


Рисунок 4 – Спектр излучения: сплошная линия – спектр, полученный после применения треугольной функции аподизации; пунктирная линия – спектр, полученный без применения аподизации

Из рисунка 4 видно, что амплитуда ложных пиков заметно снижается. Но у этого есть свой минус. Снижение утечки интенсивности в боковые лепестки приводит к ухудшению разрешения, то есть к уширению основной линии в спектре.

Теперь сравним между собой треугольную функцию и функцию Конна. Графический результат сравнения представлен на рисунке 5.

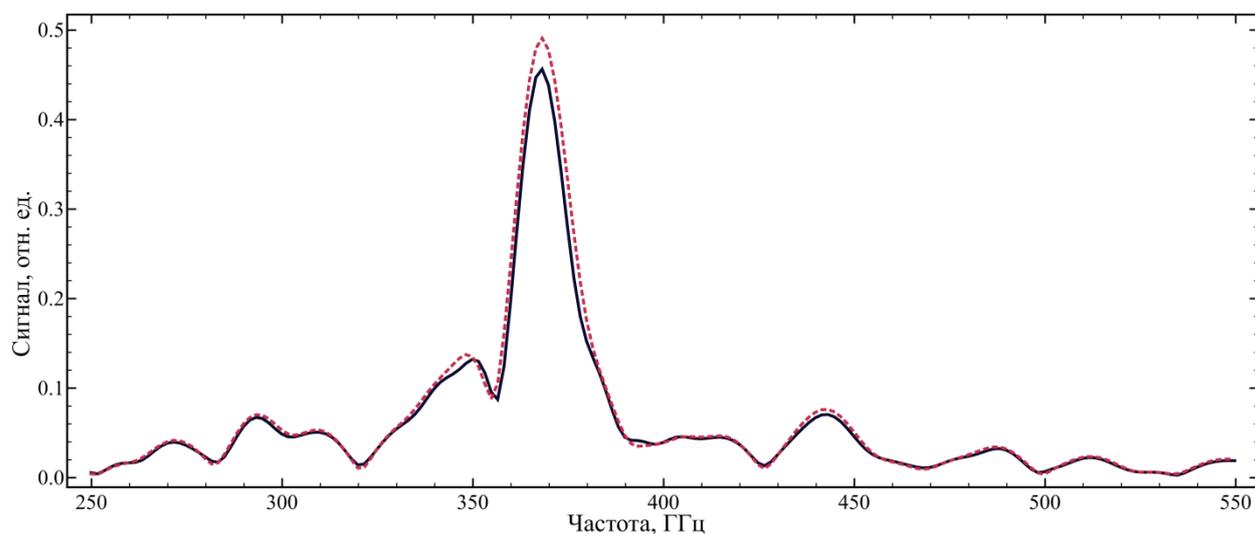


Рисунок 5 – Спектр излучения: сплошная линия – спектр, полученный после применения треугольной функции аподизации; пунктирная линия – спектр, полученный после применения функции аподизации Конна

Оценим изменения количественно. Характерный пик на каждом спектре аппроксимируем функцией Гаусса (18). Результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты вычислений для разных функций аподизации

Величины	Без аподизации	Треугольная функция	Функция Конна
Положение пика $\mu$ , ГГц	$(367,5 \pm 0,2)$	$(369,0 \pm 0,2)$	$(369,1 \pm 0,2)$
Ширина пика $\Delta$ , ГГц	$(16,2 \pm 0,1)$	$(23,2 \pm 0,2)$	$(24,0 \pm 0,1)$

В рассмотренном примере линия уширяется в среднем на 30 % для обеих функций аподизации. Поскольку в спектре не наблюдается перекрытия линий, допускается потеря части разрешения для выполнения аподизации. Основываясь на опыте, полученном при обработке интерферограмм, будем в качестве функции аподизации использовать треугольную функцию.

#### 4.2 Эффект частотола

Эффект частотола возникает, когда спектр содержит узкие линии, положения которых не совпадают с точками дискретизации [17]. Влияние эффекта может быть минимизировано, если к концу интерферограммы добавить массив нулей. Дополнение интерферограммы нулями эквивалентно интерполяции спектра и снижает ошибку преобразования. Эффект частотола представлен на рисунке 6.

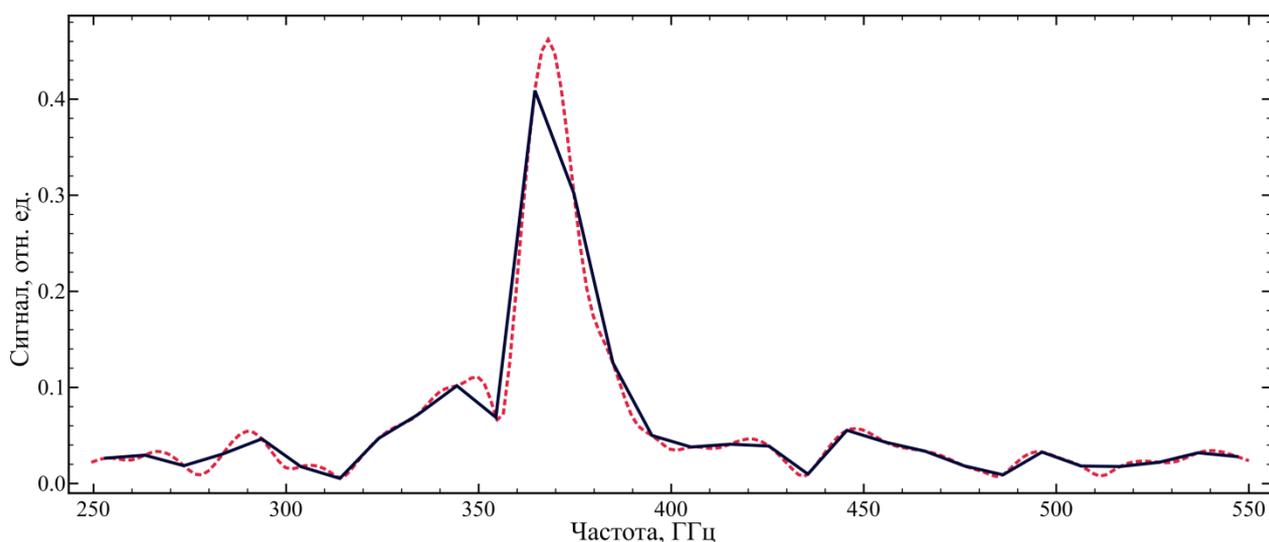


Рисунок 6 – Эффект частотола: сплошная линия – спектр без добавления нулей; пунктирная линия – спектр с добавлением нулей

Из рисунка 6 следует, что спектр при добавлении нулей становится более сглаженным. За счет уменьшения шага дискретизации на пунктирном спектре прорисовываются дополнительные линии, отсутствующие на сплошном. Оценим изменения количественно. Для этого характерный пик на обоих спектрах аппроксимируем функцией Гаусс (18). Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты вычислений

	Сплошной спектр		Пунктирный спектр	
	$\mu$ , ГГц	$\Delta$ , ГГц	$\mu$ , ГГц	$\Delta$ , ГГц
Значение	368,9	26,8	369,0	23,2
Неопределенность параметров аппроксимации	$\pm 0,7$	$\pm 0,6$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$

Из приведенных результатов видно, что в данном конкретном случае добавление нулей к интерферограмме не приводит к смещению линии в пределах погрешности. При этом ширину линии удастся уменьшить на 13 %. Это связано с возрастанием амплитуды пика, обусловленным дополнительно появившейся точкой дискретизации.

Отметим, что дополнение интерферограммы нулями не приводит к появлению ошибок в спектре. Для наших вычислений было подобрано оптимальное соотношение 1:5.

### 4.3 Неравномерная запись интерферограммы

Интерполяция — математическая операция, задача которой заключается в приближенном вычислении значений функции  $f(x)$  в точке  $x$ , не совпадающей ни с одним из  $x_0, x_1, \dots, x_n$ . Интерферограмма представляет собой набор точек, неравномерно распределенных по координате. Для равномерного расположения точек, интерполируем интерферограмму полиномом первого порядка, и вычисляем значения функции интерполяции через каждые 50 мкм. Из полученных значений формируем новую интерферограмму, которую будем называть интерполированной. Сравним, как при этом изменяется вид спектра. На рисунке 7 представлены два спектра, полученные из исходной и интерполированной интерферограмм.

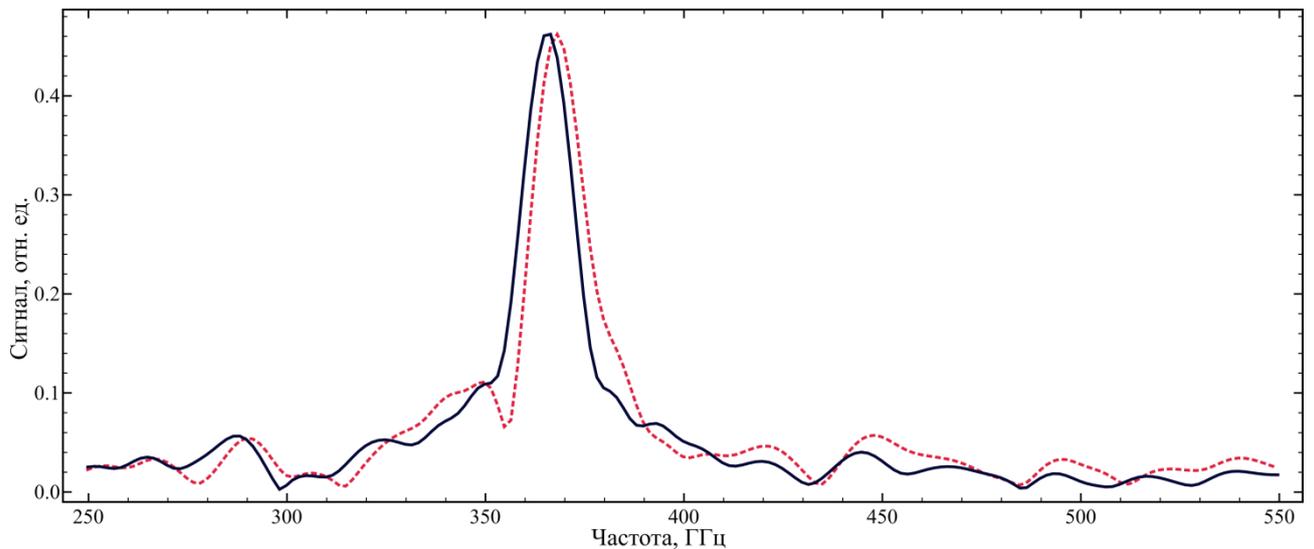


Рисунок 7 – Влияние интерполяции интерферограммы на спектр: сплошная линия – спектр, полученный из интерполированной интерферограммы; пунктирная линия – спектр исходной интерферограммы

Из представленного рисунка 7 видно, что форма спектра после интерполяции интерферограммы претерпевает некоторые изменения. В основном эти изменения касаются шумов по бокам. На пунктирном спектре слева у подножья главного максимума наблюдается довольно заметный пик, который можно считать физическим. Но на сплошном спектре этот пик отсутствует. Вычислим, как изменились характеристики главного максимума

после интерполяции интерферограммы. Для этого пик аппроксимируем функцией Гаусса (18). Результаты вычислений представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты вычислений

	Интерполированная интерферограмма		Исходная интерферограмма	
	$\mu$ , ГГц	$\Delta$ , ГГц	$\mu$ , ГГц	$\Delta$ , ГГц
Значение	365,6	22,7	369,0	23,2
Неопределенность параметров аппроксимации	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$

Из приведенных в таблице 4 результатов следует, что для данного конкретного примера, применение интерполяции к интерферограмме незначительно влияет на ширину пика. Но при этом происходит его смещение на 3,4 ГГц, что является достаточно большой разницей в условиях, когда требуется максимально точная обработка результатов эксперимента.

## 5 Статистическое моделирование

Перейдем от обработки интерферограмм к анализу получаемых спектров. В предыдущем разделе было сказано, что для анализа спектра используется аппроксимация характерных пиков. Вдобавок к этому предлагается использовать статистическое моделирование или метод Монте-Карло.

Суть метода заключается в следующем: для случайной величины генерируется набор случайных значений, подчиняющихся наперед заданному закону распределения, а затем на его основе рассчитываются необходимые величины. Для рассматриваемого случая предлагается реализовать следующую схему:

- 1) после обработки экспериментальной интерферограммы имеется массив нормированных значений сигнала. Для значений, соответствующих одному и тому же положению зеркала, подбираем функцию плотности вероятности. Прodelываем данную операцию для всех оставшихся значений;
- 2) по найденным функциям плотности вероятности генерируем случайную точку;
- 3) выполняем пункт 2 примерно 2000 раз. В конечном итоге получим 2000 смоделированных интерферограмм;
- 4) описанный в предыдущем разделе алгоритм применяем для обработки каждой смоделированной интерферограммы.

Предложенная выше схема применялась для обработки и анализа 20 экспериментальных интерферограмм. В результате тестов были обнаружены сбои, влияющие на корректность получаемых результатов. Ниже рассмотрим каждую проблему подробнее.

Из-за сбоев в системе сканирования, в ходе регистрации сигнала возникает проблема, связанная с однократными измерениями. Под однократным измерением понимается ситуация, при которой чё сигнал в фиксированном положении зеркала записывается один раз. Для одной точки

подобрать функцию плотности вероятности невозможно. Было предложено следующее решение данной проблемы:

1) для начала находим позиции однократных измерений в усредненном массиве;

2) искусственно в найденные позиции добавляем скопированное экспериментальное значение. При генерации точек это позволит в конечном итоге получить среднее значение, совпадающее с экспериментальным.

Вторая проблема связана со статистической стороной задачи. В результате случайного генерирования точек, может произойти ситуация, при которой максимум интенсивности не будет соответствовать нулевой разности хода. Таким образом, моделируемая интерферограмма, и получаемый из неё спектр, не соответствуют начальным физическим условиям. На рисунке 8 представлены два спектра, один из которых получен из экспериментальной интерферограммы, а второй – из смоделированной интерферограммы со смещенной нулевой разностью хода.

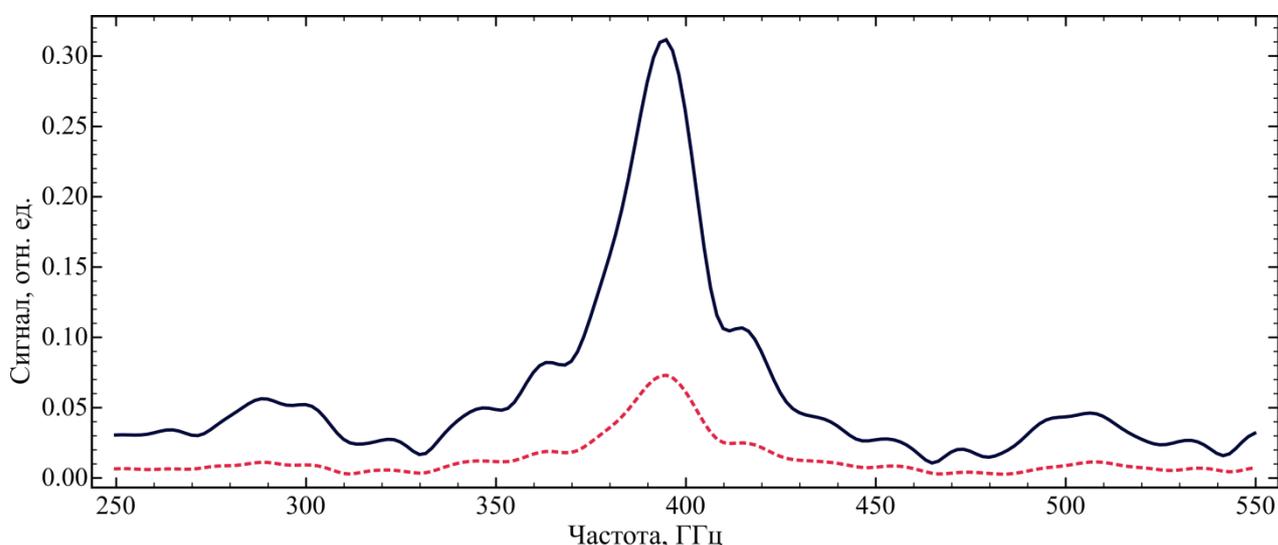


Рисунок 8 – Влияние некорректного моделирования на вид спектра: сплошная линия – исходный спектр; пунктирная линия – спектр, полученный из смоделированной интерферограммы со смещенной нулевой разностью хода

Из рисунка 8 видно, что пунктирный спектр существенно отличается от сплошного. Здесь оказываем влияние тот факт, что спектры получены от разных интерферограмм, и пунктирный спектр не может быть использован при

статистическом анализе. Для решения проблемы предлагается фиксировать положение нулевой разности хода, полученное в ходе эксперимента.

Итогом проведения моделирования, и обработки результатов моделирования, является получение 2000 смоделированных спектров. На рисунке 9 представлено сравнение результатов обработки экспериментальных данных и смоделированных.

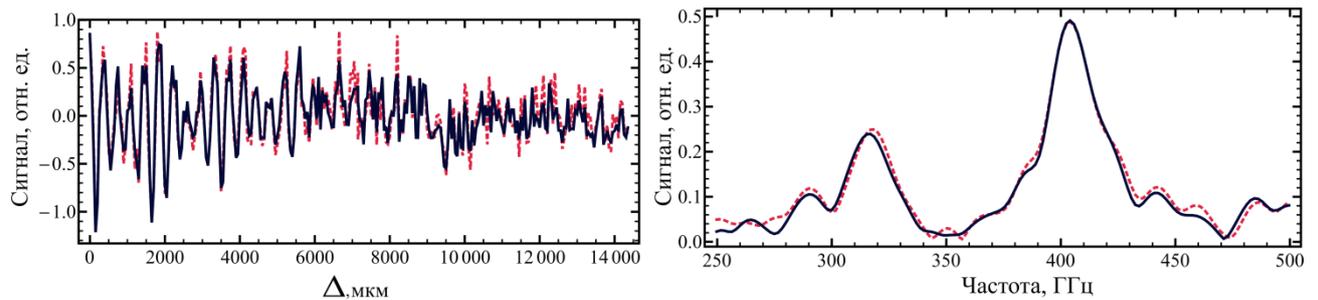


Рисунок 9 – Сравнение результатов: сплошная линия – экспериментальная интерферограмма и спектр; пунктирная линия – смоделированная интерферограмма и спектр

## 6 Анализ результатов

Конечным результатом обработки интерферограммы является (рисунок 10):

1. восстановление спектра излучения;
2. определение частот и ширин спектральных линий;
3. оценка ширины интервала, которому принадлежит

экспериментальное значение положения и ширины пика.

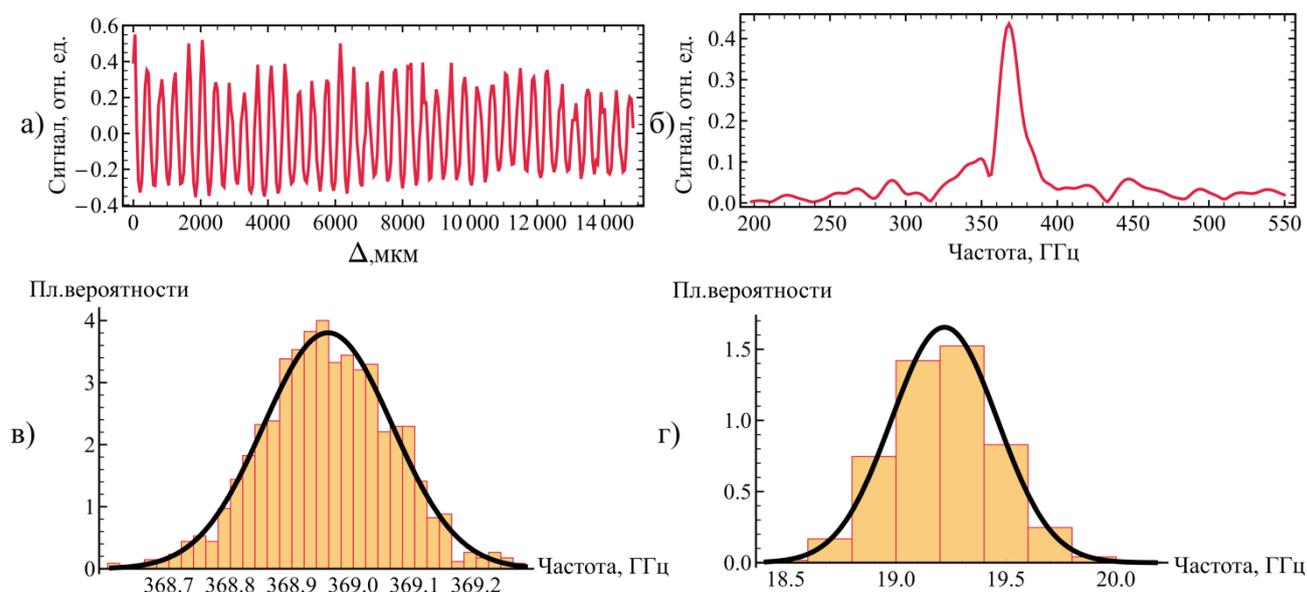


Рисунок 10 – Конечный результат обработки данных: а) интерферограмма; б) восстановленный спектр; в) гистограмма распределения положений пика; г) гистограмма распределения ширин пика

Оценку ширины интервала, которому принадлежит экспериментальное значение положения и ширины пика, проводили с помощью нахождения 0,05-квантиль и 0,95-квантиль. Результаты расчетов приведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты статистической обработки

Величины	Исходный спектр	0,05-квантиль	0,95-квантиль	Интервал
Положение пика $\mu$ , ГГц	369,0	368,8	369,1	$\mu \in (368,8, 369,1)$
Ширина пика $\Delta$ , ГГц	23,2	22,8	23,7	$\Delta \in (22,8, 23,7)$

После проведения обработки имеющихся результатов эксперимента, строим график зависимости частоты вертикально поляризованного дифракционного излучения от угла ориентации решетки (рисунок 11).

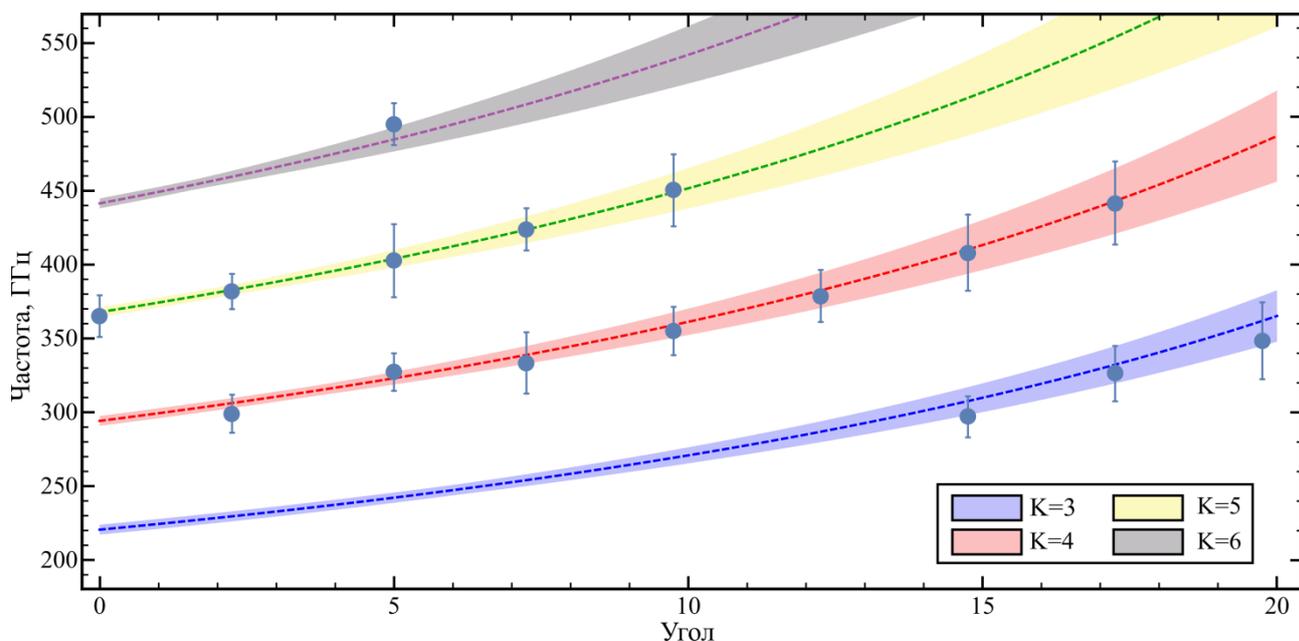


Рисунок 11 – График зависимости частоты дифракционного излучения (вертикальная поляризация) от угла ориентации решетки: штриховые линии – спектрально-угловое распределение дифракционного излучения для порядков дифракции  $k = 3-6$ , рассчитанное по формуле (2)

Такого же вида зависимость строиться для горизонтально поляризованного дифракционного излучения (рисунок 12).

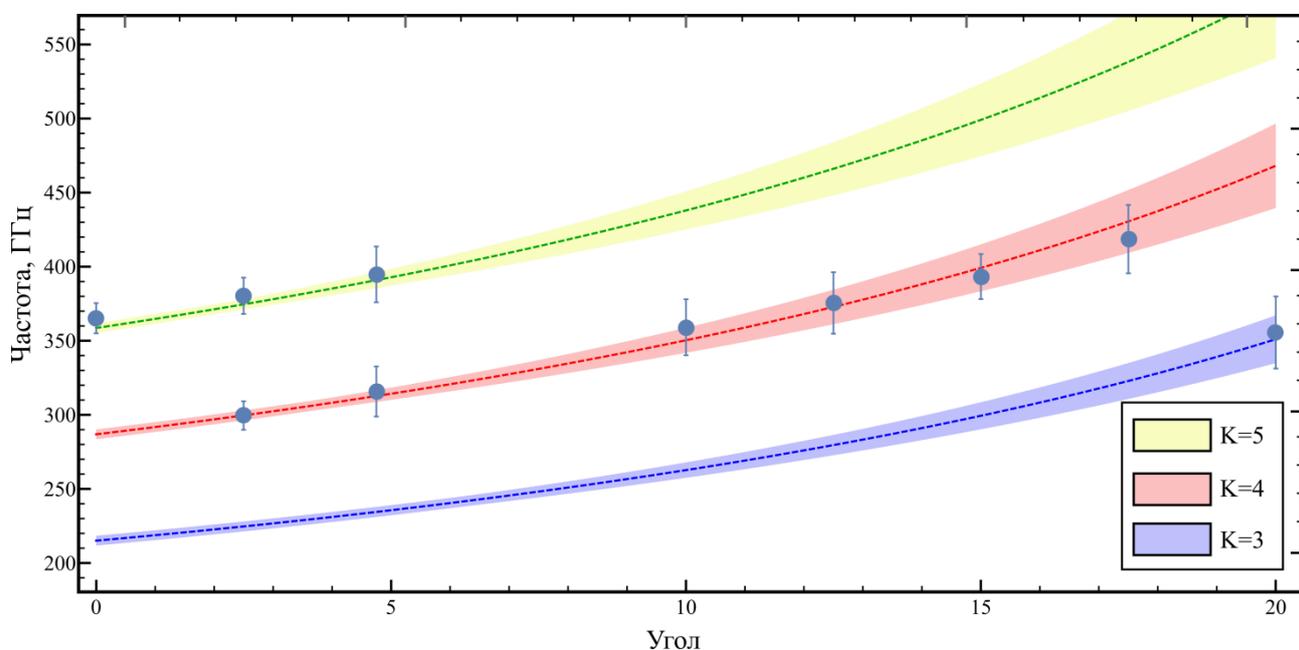


Рисунок 12 – График зависимости частоты дифракционного излучения (горизонтальная поляризация) от угла ориентации решетки: штриховые линии – спектрально-угловое распределение дифракционного излучения для порядков дифракции  $k = 3-5$ , рассчитанное по формуле (2)

На приведенных выше рисунках, закрашенные области строились с использованием следующего соотношения:

$$\Delta v_k = \sqrt{\left(\frac{\Delta v_k^{GDR}}{v_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v^{int}}{v_k}\right)^2} \cdot v_k, \quad (22)$$

где  $\Delta v_k^{GDR}$  – естественная ширина линии дифракционного излучения;  
 $\Delta v^{int}$  – разрешение интерферометра.

Для вычисления естественной ширины линии использовалось следующее условие:

$$\Delta v_k^{GDR} = \begin{cases} \frac{k \sin(\eta)}{\gamma \left( \frac{\cos(\eta)}{\beta} - \cos(\theta - \eta) \right)}, & \text{при } N_{eff} < N; \\ 1/kN, & \text{при } N_{eff} \geq N, \end{cases} \quad (23)$$

где  $\gamma$  – Лоренц-фактор.

Разрешение интерферометра определяется диапазоном сканирования интерферограммы  $L$ :

$$\Delta v^{int} = c/2L. \quad (24)$$

## **7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научных исследований и коммерциализации результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. При помощи такой оценки научный сотрудник может найти партнера для проведения дальнейших исследований, коммерциализации результатов исследований и запуска производства.

Цели главы: определить перспективность и успешность научно-исследовательского проекта; разработать механизмы управления и сопровождения проектных решений на этапе реализации.

Для достижения целей необходимо решить следующие задачи:

- разработать общую экономическую идею проекта, сформировать концепцию проекта;
- определить возможные альтернативы проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- произвести оценку коммерческого потенциала и перспективности научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективность исследования.

## 7.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

### 7.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является создание и программная реализация алгоритма для обработки и анализа интерферограмм, полученных при исследовании спектральных свойств поляризационного излучения ТГц диапазона. Разработка алгоритма и расчеты проводились в программной среде Wolfram Mathematica. На данном этапе говорить о коммерческом потенциале данного исследования рано. В связи с этим провести анализ потенциальных потребителей не представляется возможным. Данное исследование спектральных характеристик поляризационного излучения может быть полезным при разработке источников излучения в ТГц диапазоне. В качестве заинтересованных могут выступать организации, сфера деятельности которых затрагивает следующие области:

- диагностика пучков;
- источники излучения в ТГц диапазоне;
- научные исследования в области поляризационного излучения.

### 7.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ внутренних и внешних факторов научно-исследовательского проекта, направленный на оценку рисков и конкурентоспособности проекта на рынке.

Сильными сторонами данной научно-исследовательской работы можно назвать следующие особенности:

- высокая производительность предложенного алгоритма обработки экспериментальных данных;
- алгоритм включает методы решения проблем, связанных со сбоями в интерферометре;
- согласованность получаемых результатов с теоретическими расчетами;
- отсутствует необходимость высокого уровня знаний языков программирования.

Слабыми сторонами данной научно-исследовательской работы можно назвать следующие свойства и особенности:

- неполная универсальность предложенного алгоритма;
- необходимость больших вычислительных мощностей;
- необходимость наличия математического пакета Wolfram Mathematica;
- высокая стоимость математического пакета Wolfram Mathematica.

К возможностям данной работы можно отнести:

- доработка алгоритма до стадии автономной работы;
- использование годовой подписки университета на программный пакет Wolfram Mathematica;
- использование другого математического пакета.

К угрозам данной работы можно отнести:

- сбой в алгоритме;
- ограниченный диапазон возможностей применения предложенного алгоритма;
- отсутствие коммерческого интереса к работе.

Для более подробного рассмотрения перспектив разработки в таблице 6 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон проекта с его возможностями.

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	0
	B2	0	-	-	+
	B3	+	+	+	0

В таблице 7 представлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 7 – Матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>                      C1: Высокая производительность предложенного алгоритма обработки экспериментальных данных;                      C2: Алгоритм включает методы решения проблем, связанных со сбоями в интерферометре;                      C3: Согласованность получаемых результатов с теоретическими расчетами;                      C4: Отсутствует необходимость высокого уровня знаний языков программирования.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>                      Сл1: Неполная универсальность предложенного алгоритма;                      Сл2: Необходимость больших вычислительных мощностей;                      Сл3: Необходимость наличия математического пакета Wolfram Mathematica.</p>
<p><b>Возможности:</b>                      В1: Доработка алгоритма до стадии автономной работы;                      В2: Использование годовой подписки университета на программный пакет Wolfram Mathematica;                      В3: Использование другого математического пакета.</p>	<p>1. Возможность использования усовершенствованного алгоритма для обработки результатов будущих экспериментов на ускорителе КЕК LUCX;                      2. При возникновении проблем с математическим пакетом Wolfram Mathematica, весь алгоритм можно реализовать в другой среде.</p>	<p>1. Для увеличения вычислительной мощности можно использовать ЭВМ университета;                      2. Достижение универсальности алгоритма за счет реализации новых идей.</p>
<p><b>Угрозы:</b>                      У1: Сбои в алгоритме;                      У2: Ограниченный диапазон возможностей применения предложенного алгоритма;                      У3: Отсутствие коммерческого интереса к работе.</p>	<p>Возможность тестирования алгоритма на результатах более чем 20 экспериментов, в ходе которых можно выявить, и устранить последние неисправности.</p>	<p>1. Возможность изменения структуры алгоритма для обработки результатов аналогичных экспериментов;                      2. Ликвидацию сбоев в алгоритме можно осуществлять во время расчетов.</p>

## 7.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 7.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и инженеры, техники и лаборанты, при этом численность групп может варьироваться от 3 до 15 человек. В рамках данной научно-исследовательской работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли:

- научный руководитель;
- студент.

Порядок следования этапов и работ, а также распределение обязанностей по данным видам работ, приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследования	2	Выбор направления исследования	Научный руководитель
	3	Разработка методики проведения исследования	Научный руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме исследования	Научный руководитель
Теоретические исследования	5	Подбор и изучения литературы по теме исследования	Студент
	6	Освоение программного обеспечения	Студент
	7	Создание и программная реализация алгоритма обработки данных	Студент

Продолжение таблицы 8

Выполнение расчетов	8	Тестирование алгоритма	Студент
	9	Расчет спектров излучения	Студент
	10	Построение графических зависимостей	Студент
Оценка результатов и оформление отчета по НИР	11	Проверка и анализ полученных результатов	Научный руководитель Студент
	12	Оформление расчетов	Студент
	13	Составление пояснительной записки	Студент
	14	Подготовка работы к защите	Студент

### 7.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

В большинстве случаев, трудовые затраты образуют основную часть стоимости проекта, поэтому важно определить трудоемкость работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования выражается в человеко-днях, и носит вероятностный характер. Ожидаемое значение трудоемкости  $t_{ож_i}$  вычисляется по формуле:

$$t_{ож_i} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5}, \quad (25)$$

где  $t_{ож_i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;  $t_{min_i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;  $t_{max_i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Из  $t_{ож_i}$  определяются продолжительность каждой из работ в рабочих днях, учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{p_i} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i}, \quad (26)$$

где  $T_{p_i}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $Ч_i$  – количество исполнителей, выполняющих одну и ту же  $i$ -ю работу.

### 7.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – это вид столбчатых диаграмм, использующиеся для иллюстрации графика работ по проекту. Работы по проекту представляются в виде отрезков, расположенных на горизонтальной шкале времени. Начало, конец и длина отрезка характеризуют начало, конец и срок выполнения работы.

Для построения диаграммы, длительность каждого из этапов работ переводится в календарные дни по следующей формуле:

$$T_{k_i} = T_{p_i} \cdot k_{кал}, \quad (27)$$

где  $T_{k_i}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях;  $k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности вычисляется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (28)$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году;  $T_{вых}$  – количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – количество праздничных дней в году.

Результаты вычислений, полученные по вышеприведенным формулам, представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность в раб. днях, $T_{p_i}$		Длительность работ в календарных днях, $T_{k_i}$	
	$t_{min_i}$ , чел.-дни		$t_{max_i}$ , чел.-дни		$t_{ож_i}$ , чел.-дни					
	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р
1. Составление и утверждение технического задания	–	1	–	3	–	1,8	–	2	–	2
2. Выбор направления исследования	2	1	3	2	2,4	1,4	1	1	2	1
3. Разработка методики проведения исследования	–	2	–	6	–	3,6	–	4	–	4

Продолжение таблицы 9

4. Календарное планирование работ по теме исследования	–	1	–	3	–	1,8	–	2	–	2
5. Подбор и изучения литературы по теме исследования	7	–	10	–	8,2	–	8	–	10	–
6. Освоение программного обеспечения	2	–	5	–	3,2	–	3	–	4	–
7. Создание и программная реализация алгоритма обработки данных	15	–	20	–	17	–	17	–	21	–
8. Тестирование алгоритма	3	–	5	–	3,8	–	4	–	5	–
9. Расчет спектров излучения	5	–	8	–	6,2	–	6	–	8	–
10. Построение графических зависимостей	2	–	4	–	2,8	–	3	–	3	–
11. Проверка и анализ полученных результатов	2	1	3	2	2,4	1,4	1	1	2	1
12. Оформление расчетов	1	–	2	–	1,4	–	2	–	2	–
13. Составление пояснительной записки	2	–	3	–	2,4	–	3	–	3	–
14. Подготовка работы к защите	3	–	5	–	3,8	–	4	–	5	–

На основе данных таблицы 9 строится календарный план-график в виде диаграммы Ганта. График строится для максимального по времени исполнения работ в рамках проекта и представлен в таблице 10 с разделением по неделям и месяцам за период дипломирования.

Таблица 10 – Календарный план-график проведения ВКР

Название работы	Исполнитель	$T_{ki}$ , кал. дни	Продолжительность выполнения работ							
			Апрель			Май			Июнь	
			1	2	3	1	2	3	1	
1. Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2								

Продолжение таблицы 10

2. Выбор направления исследования	Руководитель Студент	1, 2							
3. Разработка методики проведения исследования	Руководитель	4							
4. Календарное планирование работ по теме исследования	Руководитель	2							
5. Подбор и изучения литературы по теме исследования	Студент	10							
6. Освоение программного обеспечения	Студент	4							
7. Создание и программная реализация алгоритма обработки данных	Студент	21							
8. Тестирование алгоритма	Студент	5							
9. Расчет спектров излучения	Студент	8							
10. Построение графических зависимостей	Студент	3							
11. Проверка и анализ полученных результатов	Руководитель Студент	1, 2							
12. Оформление расчетов	Студент	2							
13. Составление пояснительной записки	Студент	3							
14. Подготовка работы к защите	Студент	5							

## 7.2.4 Бюджет научно-технического исследования

При формировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе планирования бюджета НТИ затраты группируются по следующим статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных исследований;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- научные затраты и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

### 7.2.4.1 Основная заработная плата исполнителей работы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{zn} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (29)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (30)$$

где  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата;  $T_p$  – количество рабочих календарных дней.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (31)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дни (таблица 11).

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	52
– праздничные дни.	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	48
– больничный отпуск.	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = k_p \cdot Z_{\text{мс}}, \quad (32)$$

где  $k_p$  – районный коэффициент (для г. Томска равен 1,3);  $Z_{\text{мс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.

Аналогичные вычисления проводятся для студента бакалавра. Для студента заработная плата берется в размере 9893 рублей. Результаты расчетов представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{мс}}$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Научный руководитель	33664	1.3	43763	1813	10	18133
Студент	9893	1.3	12861	533	52	27710
Итого, руб.:						45843

#### 7.2.4.2 Дополнительная заработная плата исполнителей работы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей работы учитывают величину предусмотренных ТК РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн}, \quad (33)$$

где  $k_{дон}$  – коэффициент дополнительной заработной платы.

Выберем коэффициент  $k_{дон}$  равным 0,12. Тогда дополнительная заработная плата для научного руководителя будет следующей:

$$Z_{дон} = 2176 \text{ руб.} \quad (34)$$

#### 7.2.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые фонды)

В данном разделе 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:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{дон}), \quad (35)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30% в 2018 от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИОКР [18]. На основании пункта 1 ст.58 закона № 212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность водится пониженная ставка – 27,1 %.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды от затрат на оплату труда научному руководителю представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Отчислений во внебюджетные фонды

Наименование	Научный руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	18133	27710
Дополнительная заработная плата, руб.	2176	—
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0.271	0.271
Итоговая сумма отчислений, руб.	5504	7510

#### 7.2.4.4 Накладные расходы

Затраты на электроэнергию во время выполнения ВКР составили:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5.8 \cdot 0.7 \cdot 312 = 1267 \text{ руб.}, \quad (36)$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию, руб.;  $P$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;  $F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

#### 7.2.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование	Сумма, руб.
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	45843
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	2176
Отчисления во внебюджетные фонды	13014
Накладные расходы	1267
Бюджет затрат НИИ	62300

## 8 Социальная ответственность

В связи с различными чрезвычайными ситуациями, возникающими на предприятии, важным является обеспечение безопасности рабочих мест, профилактика и предотвращение возможных опасных ситуаций. Основным направлением профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Параллельно с этим должно осуществляться последовательное повышение качества и эффективности средств коллективной и индивидуальной защиты от опасных и вредных факторов производства, увеличение объема их выпуска до полного удовлетворения потребностей народного хозяйства, и рациональное их использование.

Охрана труда — это система сохранения жизни и здоровья рабочих в процессе трудовой деятельности, включающая в себя технические, правовые, социально-экономические, организационные, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия [19].

Не существует полностью безвредного и безопасного производства. Задача охраны труда — минимизация рисков травматизма или заболевания рабочего с одновременным обеспечением комфорта на рабочем месте при максимальной производительности труда. Как правило, реальные производственные условия характеризуются наличием опасных и вредных факторов производства.

Согласно статье 209 ТК РФ, опасным называется такой производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме.

Согласно статье 209 ТК РФ, вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

## 8.1 Анализ опасных и вредных факторов

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

В выпускной квалификационной работе проведена обработка экспериментальных данных по изучению спектральных характеристик поляризованного излучения. В таблице 15 приведены основные вредные и опасные факторы производственного процесса.

Таблица 15 – 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	
Работа на ПЭВМ, ОЯТЦ НИ ТПУ	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038.-82 ССБТ. Электробезопасность
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее)	—	СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
	—	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р.12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность

На бакалавра, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

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

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

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

## 8.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

### 8.2.1 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. В случае успешной сдачи, сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту квалификационная группа по технике безопасности, подтверждаемая удостоверением специального образца.

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

### 8.2.2 Технические мероприятия

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 показано на рисунке 13.

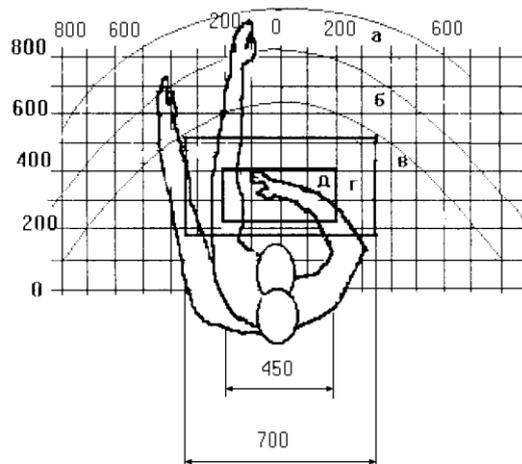


Рисунок 13 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- в центре зоны а размещается дисплей;
- клавиатура – в зоне г/д;
- слева в зоне б размещается системный блок;
- справа в зоне а находится принтер;
- документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, постоянно не используемая.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования: рекомендуется высоту рабочей поверхности стола выбирать в пределах 680-800 мм; высота рабочей поверхности, на которой располагается клавиатура, должна быть 650 мм; ширина рабочего стола должна быть не менее 700 мм, длина 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.

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.

Монитор необходимо располагать на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране. Кроме того, должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

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°. 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.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные 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.

### 8.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, ионизирующее 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 [20] и приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0.1
Теплый	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 м<sup>3</sup> на человека — не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> 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 и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [20] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц–2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц–400 кГц – 2.5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения

при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [20] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

Согласно требованиям [21], освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

### 8.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

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

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 электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

#### 8.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [22], 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 подразделяются 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 негорючих 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:

- сообщить руководителю;
- позвонить в аварийную службу 112;
- принять меры в соответствии с инструкцией.

## Заключение

В рамках проделанной работы были выполнены обработка и анализ экспериментальных данных по исследованию спектральных свойств дифракционного излучения от решетки в ТГц диапазоне. Для этого был создан, и программно реализован алгоритм математической обработки. В разработанном алгоритме учтены ошибки, связанные со сбоями в шаговом двигателе, предназначенном для перемещения зеркала. С этой целью была введена интерполяция экспериментальной интерферограммы. Для анализа получаемых спектров дополнительно реализовано статистическое моделирование, позволяющее вычислить ширину интервала, которому принадлежит экспериментальное значение положения и ширины пика.

Полученная зависимость частоты дифракционного излучения от угла ориентации решетки в случае вертикальной поляризации (рисунок 11) хорошо согласуется с теорией во всем исследуемом диапазоне углов, вплоть до 6-ого порядка дифракции. В случае горизонтально поляризованного излучения (рисунок 12) также наблюдается согласие с теорией, но в ходе обработки результатов не было обнаружено излучения, соответствующего 6-му порядку дифракции.

Полученные результаты свидетельствуют о спектральной перенастройке дифракционного излучения. Помимо выбора частоты излучения, можно изменять ширину спектральной линии для одной и той же частоты путем перехода на другой порядок дифракции при изменении угла ориентации решетки  $\eta$ .

В дальнейшем результаты работы планируется использовать для будущих экспериментов по изучению дифракционного излучения на ускорителе КЕК LUCX.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A.P. Potylitsyn – Transition radiation and diffraction radiation. Similarities and difference // Institute for Nuclear Physics, Tomsk Polytechnic University. — 1998. — P. 169-179.
2. Reconstruction of the time profile of 20.35 GeV, subpicosecond long electron bunches by means of coherent Smith-Purcell radiation / H. L. Andrews, F. Bakkali Taheri, J. Barros et al. // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams. 2014. Vol. 17. 052802 pp.
3. S.J. Smith, E.M. Purcell. Visible light from localized surface charges moving across a grating // Physical Review. Letters to the editor. — 1953. — Vol. 92. — 1069 pp.
4. И.М. Франк. Эффект Допплера в преломляющей среде // Известия АН СССР, сер. Физ. — 1942. — Т. 6. — С. 3.
5. A.P. Potylitsyn, D.V. Karlovets, G. Kube. Resonant diffraction radiation from inclined gratings and bunch length measurements // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2008. — Vol. 266. — 3781–3788 pp.
6. A.P. Potylitsyn, P.V. Karataev, G.A Naumenko. Resonant diffraction radiation from an ultra-relativistic particle moving close to a tilted grating // Physical Review E. — 2000. — V. 61. — P. 7039-7045.
7. Monochromaticity of coherent Smith-Purcell radiation from finite size grating / A. Aryshev, A. Potylitsyn, G. Naumenko et al. // Physical Review Accelerators and Beams. 2017. Vol. 20, 024701pp.
8. Femtosecond response time measurements of a  $Cs_2Te$  photocathode / A. Aryshev, M. Shevelev, Y. Honda et al. // Applied Physics Letters. 2017. Vol. 111, 033508 pp.
9. Coherent radiation spectrum measurements at KEK LUCX facility / M. Shevelev, A. Aryshev, S. Araki et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 771, pp. 126-133.

10. Ефимова А.И., Инфракрасная Фурье-спектрометрия: Учебное пособие / А.И. Ефимова, В. Б. Зайцева, Н.Ю. Болдырев, П.К. Кашкаров; М.: Физический факультет МГУ, 2008. – 133 с.

11. Смит А., Прикладная ИК спектроскопия, «Мир», М., 1982.

12. Белл Р. Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. М., Мир, 1975, 380 с.

13. Зорич В.А., Математический анализ. – М.: Физматлит, 1984. – 544 с.

14. Крылов А.С., Обработка данных Фурье-спектроскопии: методические пособие / А.С. Крылов, А.Н. Втюрин, Ю.В. Герасимова; Институт физики им. Л.В. Киренского. – Красноярск, 2005. – 48 с.

15. Егоров А.С., Инфракрасная Фурье-спектроскопия: учебно-методическое пособие для аспирантов / А.С. Егоров; Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2012. – 40 с.

16. Сергиенко А.Б., Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко – СПб.; Питер, 2002. — 608 с.

17. Тарасевич Б.Н., Основы ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб к ИК спектроскопии: метод. указания для студ. дипломников / Б.Н. Тарасевич; МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2012. – 22 с.

18. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

19. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.

20. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».

21. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78).

22. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.