

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

<small>Тема работы</small>
Моделирование дифракционного излучения от металлических мишеней различной формы и конфигурации
УДК <u>621.384.663</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6А	Дышеков Астемир Анзорович		

Руководитель

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

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
м.н.с. ИШФВП	Шкитов Дмитрий Андреевич	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.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 Петр Николаевич	к.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Общекультурные компетенции	
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.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Профессиональные компетенции	
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.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Р11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
Р12	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.
Р13	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;
Р14	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.
Р15	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»**

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ П.Н. Бычков
 « ____ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А6А	Дышеков Астемир Анзорович

Тема работы:

Моделирование дифракционного излучения от металлических мишеней различной формы и конфигурации	
Утверждена приказом директора (номер, дата)	№59-91/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования – дифракционное излучение. Предмет исследования – спектрально-угловые распределения дифракционного излучения от металлических мишеней различной формы и конфигурации. Материал исследования – русско- и англоязычные научные работы по данной теме.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Аналитический обзор литературных источников, формирующих научно-теоретическую базу исследования 2. Создание численного кода для моделирования дифракционного излучения. 3. Оптимизация и верификация созданного кода. 4. Разработка моделей периодических мишеней. 5. Моделирование и анализ дифракционного излучения от периодической мишени. 6. Разработка моделей спиральной и фокусирующей мишеней. 7. Моделирование и анализ дифракционного излучения от спиральной и фиксирующей мишени.

	8. Описание полученных результатов. 9. Определение результатов работы и перспектив дальнейшего исследования.
Перечень графического материала	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Создание, оптимизация и верификация компьютерного кода	Младший научный сотрудник ИШФВП Шкитов Дмитрий Андреевич
Свойства терагерцового излучения от решётки, генерируемого релятивистским электронным пучком	
Генерация электромагнитного излучения с помощью механизма дифракционного излучения от криволинейных поверхностей	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ 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 ИШФВП	Потылицын Александр Петрович	д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6А	Дышеков Астемир Анзорович		

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

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 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.01.20	Составление и утверждение технического задания	5
27.01.20	Подбор и изучение материалов по теме	10
01.02.20	Выбор направления исследования	5
01.03.20	Дополнение теории и создание расчетных программ	40
01.05.20	Проведение моделирования	20
01.06.20	Анализ и описание результатов	15
12.06.20	Подготовка к защите ВКР	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

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

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник ИШФВП	Шкитов Дмитрий Андреевич	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

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

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

Студенту:

Группа 0А6А	ФИО Дышеков Астемир Анзорович
-----------------------	---

Школа Уровень образования	ИЯТШ бакалавр	Отделение школы (НОЦ) Направление/специальность	ОЯТЦ 14.03.02 Ядерная физика и технологии / Физика атомного ядра и частиц
-------------------------------------	-------------------------	---	--

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды - 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения НИ	Структура работ, определение трудоемкости, разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета НИ	Расчет бюджета затрат на выполнение НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности НИ	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. «Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.02.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кацук Ирина Вадимовна	к.т.н доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6А	Дышеков Астемир Анзорович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А6А	Дышеков Астемир Анзорович

Школа		Отделение (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Тема ВКР:

Моделирование дифракционного излучения от металлических мишеней различной формы и конфигурации	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является дифракционное излучение от металлических мишеней различной формы и конфигурации. Исследование в данной работе ориентируется на проведение экспериментов на исследовательском микротроне ТПУ. Исследуемы мишени нацелены на создание источников электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне. Второе по важности применение данных мишеней – диагностика заряженных пучков. Исследование проводится на основе созданного компьютерного кода и экспериментальных данных. Рабочая зона – лаборатория ТПУ (операторская) для экспериментов и офисное помещение с компьютером для моделирования.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ"; – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ; – ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ).

<p>2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отклонение показателей микроклимата; – превышение уровня шума; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень электромагнитный излучений; – психофизиологические нагрузки; – повышенный уровень ионизирующих излучений; – повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>анализ воздействия процесса исследования на окружающую среду.</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – анализ типичной ЧС – пожар в рабочем помещении; – превентивные меры и порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.02.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6А	Дышеков А.А.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 117 страницы, 42 рисунков, 24 таблиц, 50 источников, 39 формул.

Ключевые слова: дифракционное излучение, терагерцовое излучение, обобщенный метод поверхностных токов, закрученные фотоны, численный код.

Объектом исследования является дифракционное излучение от металлических мишеней различной формы и конфигурации.

Целью работы является исследование свойств дифракционного излучения от металлических мишеней различной формы и конфигурации с помощью компьютерного моделирования для создания источника электромагнитного излучения.

Для моделирования дифракционного излучения был создан численный код на основе обобщенного метода поверхностных токов. Компьютерный код был реализован на языке *Wolfram Language*.

В результате проведенного исследования было заключено, что периодические мишени могут служить в качестве регулируемых источников терагерцового излучения. В работе в качестве источника закрученного излучения было предложено использовать мишень в форме геликоида (спирали). На основании выполненного анализа, были подобраны размеры данной спиральной мишени в рамках подготовки эксперимента на микротроне Томского политехнического университета. Также были очерчены области применяя фокусирующих мишеней, исходя из полученных результатов моделирования.

Оглавление

Введение	14
1. Создание, оптимизация и верификация компьютерного кода	16
1.1 Обобщённый метод поверхностных токов и его ограничения	16
1.2 Описание кода	22
1.3 Геометрия плоской мишени.....	23
1.4 Численное интегрирование в Wolfram Language.....	25
1.5 Оптимизация кода.....	28
1.6 Верификация кода.....	30
1.7 Задачи на будущее	35
2. Свойства терагерцового излучения от решётки, генерируемого релятивистским электронным пучком	36
2.1 Основные параметры моделирования	37
2.2 Спектральные распределения	40
2.3 Интенсивность генерируемого излучения	43
2.4 Частотные характеристики излучения.....	44
2.5 Сравнение с экспериментальными данными	47
2.6 Выводы по главе.....	51
3. Генерация электромагнитного излучения с помощью механизма дифракционного излучения от криволинейных поверхностей	52
3.1 Моделирование свойств "закрученного" излучения, генерируемого электронами от спиральной мишени	52
3.1.1 Геометрия геликоида.....	54
3.1.2 Задание спиральной мишени	56
3.1.3 Описание задачи	58
3.1.4 Результаты моделирования и их обсуждение	60
3.2 Дифракционное излучение от фокусирующей мишени	66
3.2.1 Общий алгоритм задания параболических мишеней.....	67
3.2.2 Задание внеосевой параболической мишени	68
3.2.3 Задание вектора нормали к поверхности мишени	70
3.2.4 Результаты моделирования дифракционного излучения от фокусирующей мишени и их обсуждение	70
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	76

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	76
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	76
4.1.2 SWOT-анализ	78
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	79
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	79
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.....	80
4.3 Бюджет научно-технического исследования	85
4.3.1 Материальные затраты на НИ	85
4.3.3. Основная заработная плата.....	87
4.3.4 Дополнительная заработная плата	88
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	88
4.3.6. Накладные расходы	89
4.4. Определение ресурсоэффективности исследования	89
4.4.1. Интегральный показатель финансовой эффективности	89
4.4.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности	91
4.4.3. Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки.....	92
4.5. Выводы по разделу	93
5. Социальная ответственность	95
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	95
5.2.1 Анализ выявленных вредных производственных факторов	99
5.3.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов	106
5.3 Экологическая безопасность.....	109
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	109
Заключение	112
Список литературы	113

Введение

Дифракционное излучение (ДИ) [1] это один из видов поляризационного излучения, которое возникает в результате динамической поляризации атомов вещества посредством воздействия кулоновского поля заряженной частицы на вещество. Это же излучение называется широко известным переходным излучением, в случае, когда частица пересекает границу раздела двух сред, и дифракционным излучением, когда частица пролетает рядом с мишенью и только поле взаимодействует с ней. Сейчас ДИ применяется для диагностики [2, 3] пучков заряженных частиц в ускорителях, а также для создания источников [4, 5, 6] электромагнитного излучения. Свойства дифракционного излучения сильно зависят от формы и положения мишени. Правильно подобранная форма и геометрия расположения мишени позволяет получить излучение с необходимыми характеристиками (частотой, монохроматичностью, мононаправленностью и т.д.). Для этого необходимо исследовать свойства дифракционного излучения от рассматриваемой мишени. Однако в настоящее время у экспериментаторов существует возможность использовать для расчёта характеристик ДИ либо аналитические формулы (с многочисленными допущениями), либо коммерческие пакеты моделирования [7], требующие времени на освоение и опыта применения. Также данные программные комплексы не специализируются непосредственно на моделировании поляризационных излучений, а нацелены на решения широкого класса задач. Такая универсальность зачастую является недостатком в решении специализированных задач, как моделирование дифракционного излучения, так как цена универсальности в большинстве случаев – относительно низкая производительность расчётов. Существуют и некоммерческие программы, специализирующиеся на вычислении характеристик, в том числе и поляризационного излучения, однако о них мало информации в открытом доступе, и их использование зачастую ограничено организацией, в которой был разработан программный код. Поэтому есть необходимость создать простое и понятное в использовании специализированное программное обеспечение для

расчёта характеристик ДИ [8] с потенциалом широкого распространения в исследовательском научном сообществе.

Для решения существующей проблемы был создан компьютерный код, позволяющий производить численное моделирование свойств дифракционного излучения (в том числе и переходного) для начала только от различных металлических мишеней (т.е. не диэлектрических). В качестве языка программирования для реализации данного кода был выбран *Wolfram Language*, благодаря своим функциональным возможностям. Пакет *Wolfram Mathematica* может способствовать в распространении и освоении программы среди потенциальных пользователей, не обладающих специализированными навыками программирования и математического моделирования, благодаря интуитивно-понятному интерфейсу. Также огромным преимуществом выбранной платформы является его динамическое развитие. Возможности *Wolfram Mathematica* постоянно расширяются с одновременной оптимизацией существующих алгоритмов. Стоит отметить большую базу данных собранных *Mathematica* в области математического моделирования, способствовавшая созданию и развитию кода по моделированию дифракционного излучения. *Wolfram Language* относительно легко взаимодействуют с библиотеками других языков программирования, что удачно не ограничивает созданный код в дальнейшем развитии.

Целью данной бакалаврской работы являлось исследование свойств дифракционного излучения от мишеней различной формы и конфигурации с помощью компьютерного моделирования для создания источника электромагнитного излучения. В соответствии с этой целью были поставлены следующие основные задачи:

- Создание кода на основе обобщённого метода поверхностных токов на языке *Wolfram Language* его оптимизация и верификация;
- Моделирование и анализ излучения от периодической мишени;
- Моделирование и анализ излучения от спиральной и фокусирующей мишени.

1. Создание, оптимизация и верификация компьютерного кода

Данный раздел посвящен описанию созданного кода, который использовался при проведении исследования. Здесь также непосредственно описан метод, на котором базируется код, и ограничения его применения. Также разобраны численные методы, используемые при вычислениях. В разделе представлены геометрии наиболее простых плоских мишеней, для которых были произведены расчёты для сопоставления с экспериментальными данными, с целью проверки правильности результатов моделирования. В ходе работы была проведена оптимизация кода, результаты которой также представлены.

1.1 Обобщённый метод поверхностных токов и его ограничения

Математическая модель, используемая в разработанном коде, основана на обобщённом методе поверхностных токов [8, 9]. Данный метод подходит для расчёта характеристик излучения от мишеней с идеальной проводимостью (например, случай металлической мишени) и применим как для переходного, так и дифракционного излучения. Метод применим для заряженных частиц с произвольными энергиями (начиная от сотен кэВ и более) и произвольными углами падения к поверхностям (исключая скользящее падение), а также в диапазоне от оптики до миллиметровых длин волн. В данном методе источником поля излучения представляются поляризациянные токи на поверхности мишени, возникающие под действием кулоновского поля заряженной частицы, пролетающей рядом с мишенью или пересекающей её (в случае переходного излучения). Далее рассматривается элементарная поверхность, в котором протекает поверхностный ток, поле от которого можно рассчитать, а производя интегрирование по всей поверхности, получаем суммарное поле излучения от всей мишени. Используя градиент функции Грина, учитываем распространение данного поле в пространстве. В итоге, поле излучения имеет вид:

$$E_R^D(r_D, \nu) = \frac{1}{2\pi} \iint [[n(r_T), E_e^T(r_T, \nu)], \nabla G(r_T, r_D, \nu)] dS_T = \left[\frac{\text{Кл} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] \quad (1.1)$$

где $n(r_T)$ – единичный вектор нормали к поверхности мишени, $E_e^T(r_T, \nu)$ – напряженность электрического поля электрона, $\nabla G(r_T, r_D, \nu)$ – градиент функции Грина, $r_T = \{x_T, y_T, z_T\}$ – координаты точки на поверхности мишени, $r_D = \{x_D, y_D, z_D\}$ – координаты точки на поверхности детектора (точки наблюдения), dS_T – элементарная площадь поверхности мишени. Здесь и далее в конце формул в квадратных скобках указана размерность в стандарте СИ.

Функция вектора нормали, конечно, зависит от геометрии мишени. Для плоской мишени вектор нормали можно представить в виде:

$$n(r_T) = A(\psi) \times \{0,0,1\} \quad (1.2)$$

где $A(\psi)$ – матрица поворота нормали к мишени на угол ψ , знак « \times » – матричное произведение. В качестве примера, матрица поворота $A(\psi)$ вокруг оси Y равна $\begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix}$. Аналогично можно представить и координаты точек на детекторе:

$$r_D = B(\varphi) \times \{x_D, y_D, L\} \quad (1.3)$$

где $B(\varphi)$ – матрица поворота точки наблюдения на угол φ , L – расстояние от центра поверхности мишени до точки наблюдения (до центра детектора).

Поле, создаваемое электроном, движущимся в положительном направлении оси Z , определяется следующим образом:

$$E_e^T(r_T, \nu) = \frac{2e\nu}{\beta^2 c^2 \gamma} \cdot e^{i\frac{k}{\beta} z_T} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{x_T}{\rho} K_1\left(\frac{k}{\beta\gamma}\rho\right) \\ \frac{y_T}{\rho} K_1\left(\frac{k}{\beta\gamma}\rho\right) \\ -\frac{i}{\gamma} K_0\left(\frac{k}{\beta\gamma}\rho\right) \end{array} \right\} = \left[\frac{\text{Кл} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] \quad (1.4)$$

где e – элементарный заряд в Кл, γ – Лоренц фактор, c – скорость света в м/с, ν – частота излучения в Гц, $k = 2\pi\nu/c$ – волновое число м^{-1} , β – отношение скорости частицы к скорости света, которое связано с Лоренц-фактором через соотношение $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $\rho = \sqrt{x_T^2 + y_T^2}$ в мм, K_1 и K_0 – модифицированные

функции Бесселя 1-го и 0-го порядка, соответственно [8]. Функция Грина имеет вид:

$$G(r_T, r_D, \nu) = \frac{1}{|r_D - r_T|} \cdot e^{ik|r_D - r_T|} \quad (1.5)$$

Соответственно, градиент функции Грина имеет вид:

$$\nabla G(r_T, r_D, \nu) = \frac{r_D - r_T}{|r_D - r_T|^2} \cdot e^{ik|r_D - r_T|} \cdot \left(\frac{1}{|r_D - r_T|} - ik \right) \quad (1.6)$$

Определив поле излучения, можно рассчитать его спектрально-угловое распределение плотности потока энергии (интенсивности) от одного электрона следующим образом:

$$\frac{d^2 W_e}{d\nu d\Omega} = 2\pi c L^2 |E_R^D(r_D, \nu)|^2 = [\text{Дж} \cdot \text{с}] \quad (1.7)$$

Метод поляризационных токов [10, 11] в частности обобщённый метод поверхностных токов, основывается на макроскопических уравнениях Максвелла, поэтому на него накладываются ограничения макроскопического подхода. Метод не применим при нерелятивистских энергиях или при условии скользящего пролёта. Также метод не применим: для сверхпроводников при низких температурах, для веществ под высокими температурами, для сред с высокочастотными электромагнитными полями, для плазмы, для газа и для неоднородных сред. Ограничения накладываются и на толщину границы поверхности мишени, она должна быть во много раз меньше длины волны излучения [9].

Рассматривая переходное излучение как процесс отражения и преломления собственного кулоновского поля заряда, движущегося от поверхности раздела двух сред, перпендикулярной оси z (параллельно нормали, со скоростью $\nu = \{\nu_x, \nu_y, \nu_z\}$, автор работы [12] показал, что из условий сохранения частоты поля и тангенциальных к плоскости раздела компонент волнового вектора следуют два критерия применимости макроскопического подхода:

$$k a_0 \ll 1 \quad (1.8)$$

$$(\omega - k_x v_x - k_y v_y) \frac{a_0}{v_z} \ll 1 \quad (1.9)$$

где ω – циклическая частота; k_x и k_y – проекции волнового вектора (см. рис. 1а), a_0 – межатомное расстояние.

Условие малости (1.8) волнового вектора k излученной волны по сравнению с обратным межатомным расстоянием a_0 является основным. Однако, нарушение второго условия (1.9) даже при соблюдении первого делает макроскопическое рассмотрение некорректным. Последнее возможно в случаях, когда компонента скорости v_z в направлении движения частицы мала, т.е. при нерелятивистских энергиях или при условии скользящего пролёта (вектор скорости частицы практически параллелен плоскости мишени).

Исходя из двух критериев применимости макроскопического подхода, определим при каких углах между нормалью в точке мишени и направлением пучка, возможно использовать данный метод, реализованный в коде. Межатомное расстояние у металлов примерно одинаково и находится в диапазоне около 3-6 ангстрем. Для золота это 4 ангстрема, а для меди 3.6 ангстрем, поэтому от оптического диапазона включительно до радиоволн первый критерий (1.8) выполняется фактически всегда.

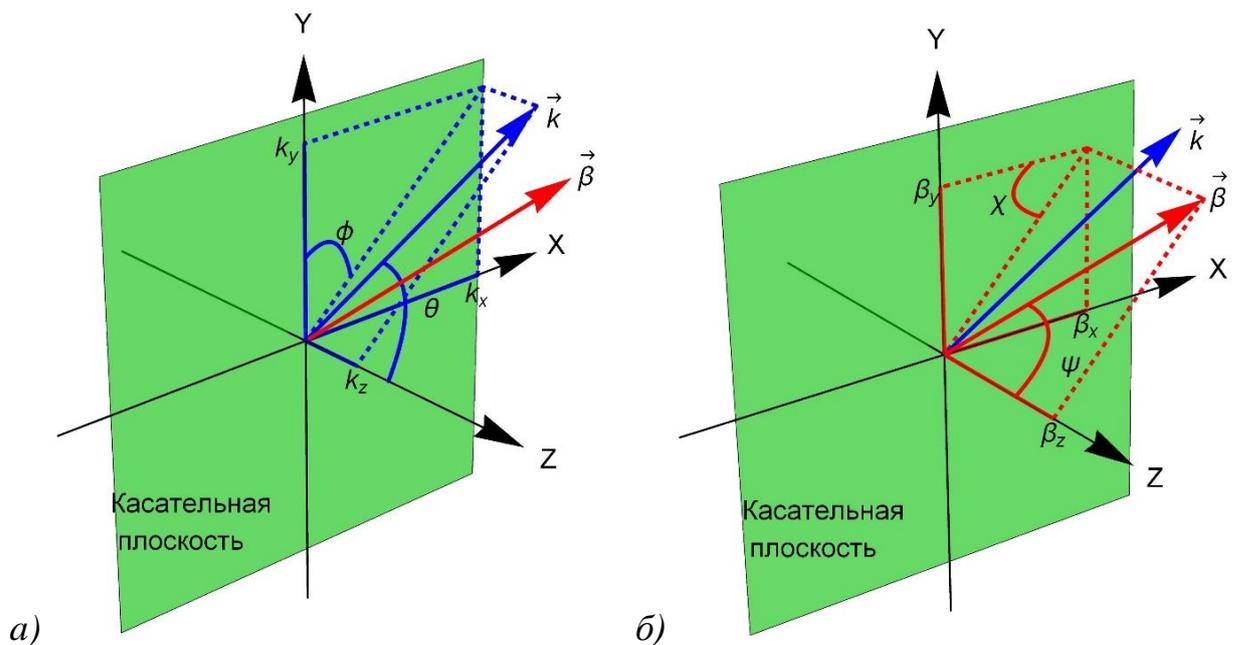


Рисунок. 1 – Схемы расчетов ограничений

Распишем компоненты формулы (1.9). Координаты волнового вектора можно задать следующим образом:

$$\vec{k} = k \vec{e} = \frac{2\pi}{\lambda} \{\sin[\theta] \sin[\varphi], \sin[\theta] \cos[\varphi], \cos[\theta]\} \quad (1.10)$$

где θ и φ – азимутальный и полярный углы сферической системы координат (см. рис. 1а).

Координаты вектора скорости:

$$\vec{v} = \vec{\beta} c = c\beta \{\sin[\psi] \cos[\chi], \sin[\psi] \sin[\chi], \cos[\psi]\} \quad (1.11)$$

где ψ – угол между вектором нормали к поверхности мишени в рассматриваемой точке и вектором $\vec{\beta}$ (χ см. рис. 1б).

Подставляем (1.9) и (1.10) в левую часть неравенства (1.8):

$$\begin{aligned} (\omega - k_x v_x - k_y v_y) \frac{a_0}{v_z} &= \frac{2\pi a_0}{\lambda\beta \cos[\psi]} \left(\frac{1}{\beta} - \sin[\theta] \sin[\varphi] \sin[\psi] \sin[\chi] - \right. \\ &\left. \sin[\theta] \cos[\varphi] \sin[\psi] \cos[\chi] \right) = \frac{2\pi a_0}{\lambda\beta \cos[\psi]} \left(\frac{1}{\beta} - \sin[\theta] \sin[\psi] (\sin[\varphi] \cos[\chi] + \right. \\ &\left. \cos[\varphi] \sin[\chi]) \right) = \frac{2\pi a_0}{\lambda\beta \cos[\psi]} \left(\frac{1}{\beta} - \sin[\theta] \sin[\psi] \sin[\varphi + \chi] \right) \ll 1 \end{aligned} \quad (1.12)$$

При больших энергиях $\frac{1}{\beta} \approx 1$, поэтому справедливо следующее неравенство:

$$\left(\frac{1}{\beta} - \sin[\theta] \sin[\psi] \sin[\varphi + \chi] \right) \approx (1 - \sin[\theta] \sin[\psi] \sin[\varphi + \chi]) \lesssim 2 \quad (1.13)$$

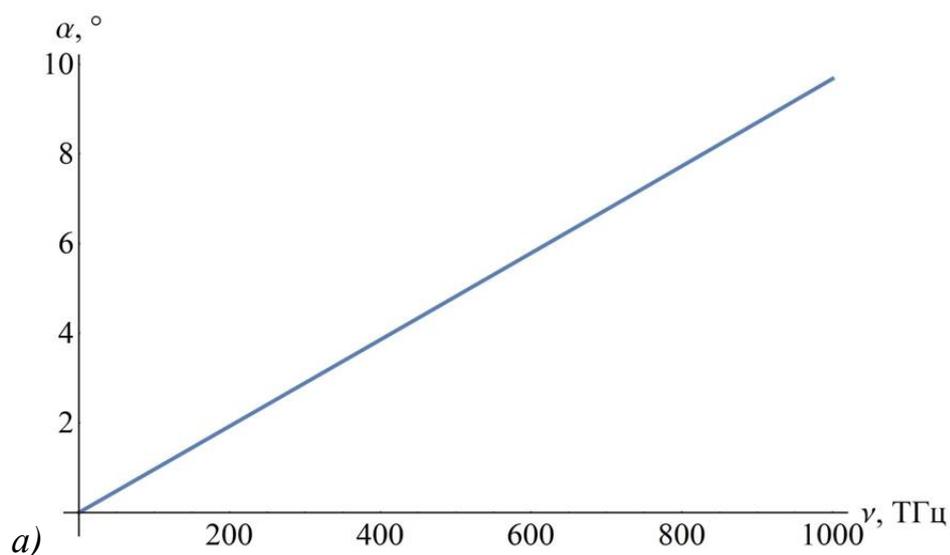
Подставляем неравенство (1.13) в неравенство (1.12), тогда получаем:

$$\frac{4\pi a_0}{\lambda\beta \cos[\psi]} \ll 1 \quad (1.14)$$

Формула (1.14) подходит для оценки углов наклона нормали, при которых метод применим. Формула получена с рядом допущений, поэтому для более точного определения границ применимости с учётом точки наблюдения, необходимо вернуться к неравенству (1.12). Однако надо понимать, что углы в формуле привязаны к системе координат отличной от системы координат, используемой в коде. В коде ось OZ направлена вдоль движения электрона (электронного пучка), поэтому система жестко зафиксирована и является статичной. В данном выводе ось OZ направлена вдоль нормали в точке мишени,

поэтому она не статична при движении по криволинейной поверхности. Поэтому неравенство (1.12) не подходит для учёта углов наблюдения при определении границ применимости метода для криволинейной поверхности. Однако формула (1.14) применима к криволинейным поверхностям, так как угол ψ (угол между нормалью и направлением электронного пучка) не зависит от выбранной системы координат, но не учитывает углы наблюдения, из-за чего граница применимости взята с запасом. На практике чаще имеют дела с углом падения (α) – угол между касательной плоскости в точке и направлением пучка. Следует в дальнейшем еще раз пересмотреть вывод формул по применимости метода, закрепив их к системе координат связанной с направлением пучка.

Проанализируем полученное неравенство (1.14). На рис. 2 представлена зависимость минимального значения угла падения (α) от частоты излучения и от длины волны. Как видно, с увеличением частоты увеличивается минимальный угол падения пучка фактически линейно вплоть до оптического диапазона включительно. Стоит отметить, что для интересующего нас диапазона до 3 ТГц (верхняя граница терагерцового диапазона) ограничения кода очень незначительны (меньше 0.03°). Однако в оптическом диапазоне минимальный угол падения увеличивается до 8° , что является довольно значительным.



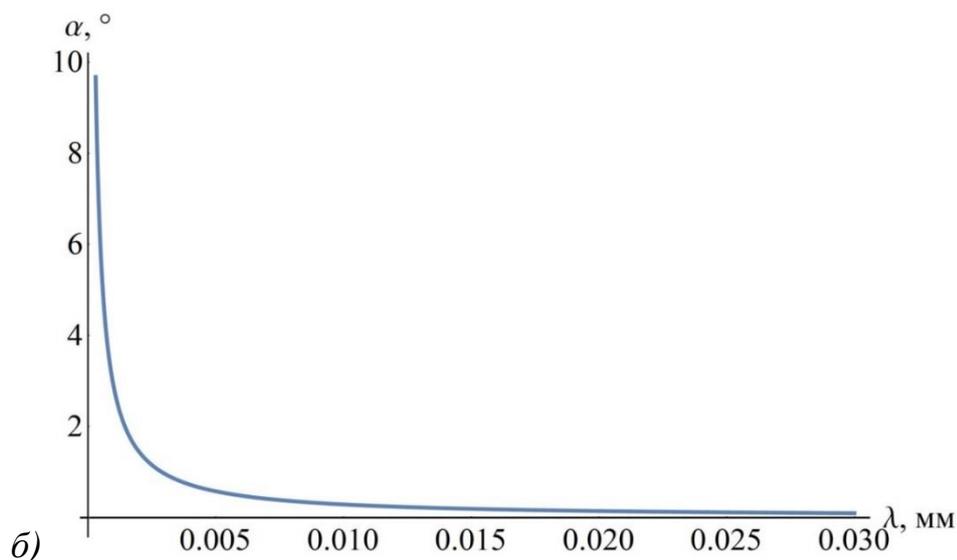


Рисунок 2 – Зависимость минимального значения от частоты (а) и длины волны (б)

1.2 Описание кода

Текущая версия (на момент написания работы) компьютерного кода [13], написанного на языке *Wolfram Language* [14], включает в себя следующие файлы:

- «Geometry.wl» – содержит функции, задающие геометрию мишени с необходимыми параметрами.
- «Functions.wl» – содержит функции, непосредственно вычисляющие напряженность поля или интенсивность излучения, возникающей от мишени, созданной с помощью функций из пакета «Geometry.wl», в заданной точке на детекторе.

В данной версии кода «Geometry.wl» содержит функции задающие геометрии разнообразных плоских, различных криволинейных (глава 3) и периодических (глава 2) мишеней. На вход выбранной функции подаются параметры геометрии (например, тип мишени, размеры пластин, угол наклона пластин, прицельный параметр и её положение в пространстве и другие параметры, зависящие от типа мишени), на выходе получаем геометрическую область, которая является моделью реальной мишени. «Functions.wl» содержит две основные функции `RadiationElectricField[]` и `TotalRadiationIntensity[]`, которые соответственно вычисляют три компоненты поля излучения и его полную интенсивность в одночастичном приближении. Также файл содержит

множество промежуточных функций, список и описания которых можно узнать, путём задания соответствующего запроса в *Wolfram Mathematica* [14].

Для работы с кодом необходимо подгрузить функции из описанных выше файлов, и в дальнейшем работать с ними как со встроенными функциями системы *Mathematica*. Подробную информацию о работе с данными функциями можно узнать, запросив справки о них.

Для удобства и наглядности представления и подбора необходимых параметров геометрии мишени к коду прилагается *CDF* файл, который содержит визуализированные интерактивные схемы мишеней с возможностью регулирования и подбора множества параметров.

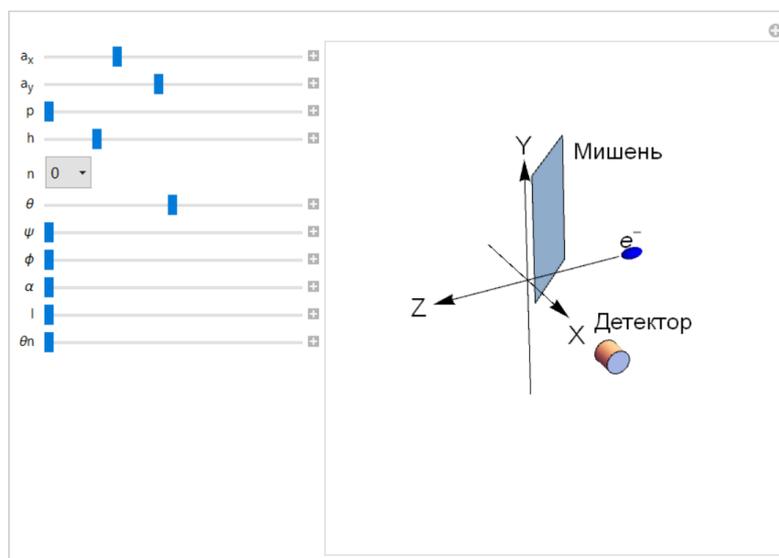


Рисунок 3 – Пример содержания *CDF* файла

1.3 Геометрия плоской мишени

Первый тип мишеней, который был создан в коде это разно-ориентированные в пространстве плоские прямоугольные пластины конечных размеров. Мишени могут состоять из одной или двух пластин. Наиболее простой представитель мишеней данного типа это пластина, центр которой расположен в начале системы координат, т.е. частица пересекает пластину (случай переходного излучения). На рис. 4 представлена другая мишень (случай дифракционного излучения), две пластины, разделенные зазором, через который пролетает частица, с разным либо одинаковым углом наклона к траектории частицы.

Основными параметрами, задающими любую плоскую мишень, являются:

- размеры пластин (на рис. 4 они обозначены a_y и a_x);
- углы наклона (ψ_1 и ψ_2), отсчитываемой от оси X ; пластины могут вращаться относительно своих краев или относительно своей центральной оси, что зависит от конкретной геометрии;
- прицельный параметр либо ширина щели h (в зависимости от типа мишени); ширина щели – это расстояние между пластинами; прицельный параметр это расстояние от оси Z до края пластины;

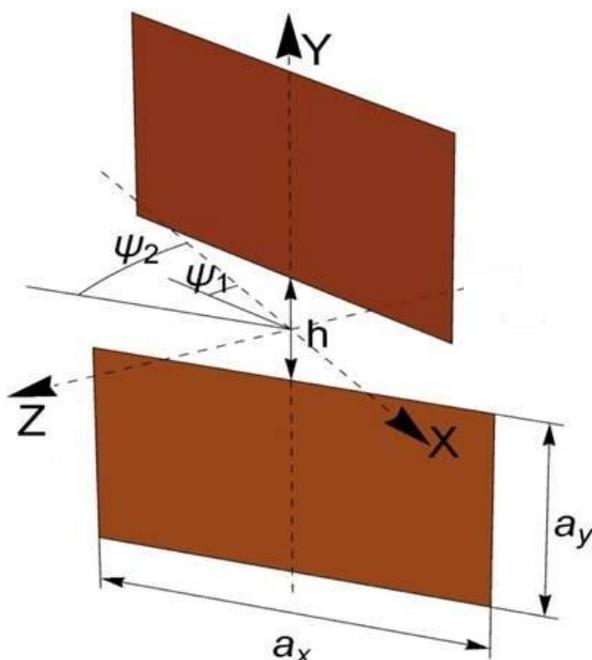


Рисунок 4 – Мишень из двух разделенных свободновращающихся прямоугольных пластин (дифракционное излучение на щели)

В случае, представленном на рис. 4, две плоскости могут вращаться относительно своих центральных осей (ось Y), причем независимо друг от друга. Для большинства геометрий достаточно использовать один угол, однако в случаях независимых поворотов пластин необходимы оба параметра. Также существует возможность сдвига всей мишени как целого в пространстве относительно траектории частицы (оси Z).

Отметим, что в системе *Mathematica* [14] по умолчанию используется правая тройка векторов, поэтому и геометрии мишеней, и расчетные функции полей привязаны именно к правой тройке векторов. Важно, что использование левой тройки векторов может привести к неправильным результатам.

1.4 Численное интегрирование в Wolfram Language

В основе вычислений в коде лежит многократное интегрирование (в частности интегрирование по поверхности мишени). Код предоставляет возможность выбора способов интегрирования. Однако по умолчанию используется встроенный в *Wolfram Language* метод "GlobalAdaptive", подробное описание которого можно найти в справке системы *Mathematica* [15].

`NIntegrate[]` использует алгоритмы, называемые "стратегиями интегрирования" [15]. Стратегия интегрирования - это алгоритм, который пытается вычислить интегральные оценки, удовлетворяющие точности, заданной пользователем. Стратегия интегрирования, как правило, предписывает, как управлять и создавать новые элементы набора непересекающихся субрегионов первоначального интегрального региона. Каждый субрегион может иметь свои собственные "правила интегрирования". Интегральная оценка представляет собой сумму интегральных оценок всех субрегионов. Стратегии интегрирования используют правила интегрирования для расчета интегральных оценок субрегиона. Правило интегрирования отсылает интеграл к набору точек, называемых "точками выборки".

Чтобы улучшить интегральную оценку, необходимо увеличивать количество точек выборки. Существует два основных подхода, как это можно реализовать: адаптивный и неадаптивный. Адаптивные стратегии пытаются определить проблемные области интеграции и сосредоточить на них вычислительные усилия (т. е. увеличение точек выборки лишь в данных областях). Неадаптивные стратегии увеличивают количество точек выборки по всему региону, чтобы достичь нужной точности. В большинстве случаев адаптивные стратегии являются более выигрышными, так как позволяют

минимизировать необходимое число точек выборки. Однако данная стратегия сильно зависит от качества анализа интегрального региона.

Глобальная адаптивная стратегия достигает требуемых целей точности и точности интегральной оценки путем рекурсивного деления субрегиона с наибольшей погрешностью на две половины и вычисляет интегральные оценки и оценки погрешности для каждой половины. Деление субрегионов будет продолжаться до тех пор, пока не будут получены нужные значения погрешности и интегральной оценки. "GlobalAdaptive" является стратегией интегрирования по умолчанию для `NIntegrate[]`. Она используется как для однократного, так и для многократного интегрирования.

"GlobalAdaptive" использует структуру данных, называемую "кучей", чтобы сохранить набор областей, частично отсортированных, с наибольшей областью ошибки в верхней части кучи. В основном цикле алгоритма наибольшая область ошибки делится в измерении, которое, по оценкам, отвечает за большую часть ее ошибки. Можно сказать, что алгоритм выдает листья бинарного дерева, узлами которого являются области. Дочерние элементы узла (региона) являются его субрегионами, полученными после деления. После деления региона и последующего интегрирования над новыми (под)регионами вычисляются новые оценки глобальных интегральных и глобальных ошибок, которые являются суммами оценок интеграла и ошибок всех регионов, которые являются листьями бинарного дерева. Каждый регион имеет запись о том, сколько раз он был разделен. Когда область была разделена на слишком много подразделов, к ней применяется алгоритм сглаживания сингулярности. Стратегия также прекращается, когда число рекурсивных разбиений области превышает определенное число ("MinRecursion" и "MaxRecursion") или когда глобальная ошибка интеграции слишком сильно колеблется ("MaxErrorIncreases"). Минимальные и максимальные глубины рекурсивных разбиений задаются значениями параметров "MinRecursion" и "MaxRecursion". Если для любого субрегиона число разделений в любом из

измерений больше, чем "MaxRecursion", то интегрирование по "GlobalAdaptive" останавливается.

В случаях, когда невозможно применение стратегии "GlobalAdaptive", можно использовать стратегию интегрирования "MonteCarlo" [15], основанной на методе Монте-Карло. Данная стратегия оценивает расчётный интеграл путем усреднения значений подынтегрального выражения по равномерно распределенным случайным точкам из области интегрирования. Число сгенерированных точек будет увеличиваться до тех пор, пока расчетное стандартное отклонение не станет достаточно маленьким для достижения заданных целей точности, или число точек не достигнет максимального заданного значения. Максимальное число точек определяется опцией "MaxPoint". Алгоритм Монте-Карло называется квазиалгоритмом Монте-Карло, если он использует равномерно распределенные детерминированные последовательности точек вместо равномерно распределенных случайных точек.

В методе Монте-Карло d -мерный интеграл $\int_V f(x) dx$ по области V вычисляется по следующей формуле [15]:

$$\begin{aligned} \int_V f(x) dx &= \text{vol}(V) \int_{R^d} \frac{1}{\text{vol}(V)} \text{Boole}(x \in V) f(x) dx \\ &= \text{vol}(V) E(f(x)) \end{aligned} \quad (15)$$

где $f(x)$ – подынтегральная функция; $\text{vol}(V)$ – плотность вероятности случайных точек; $E(f(x))$ – среднее значение функции в области V , вычисляемое по сгенерированным точкам.

Основанными преимуществами метода Монте-Карло являются его простота и универсальность. Алгоритм применим к любым многомерным регионам. Однако универсальность метода компенсируется его слабой сходимостью точности расчетов, которая пропорциональна квадратному корню числу точек. То есть, если необходимо уменьшить погрешность расчетов в 2 раза, то нужно сгенерировать в 4 раза больше точек. А непосредственно время расчёта интеграла прямо пропорционально числу точек. Таким образом, при увеличении

точности интегрирования на один порядок, время расчетов увеличивается в 100 раз.

1.5 Оптимизация кода

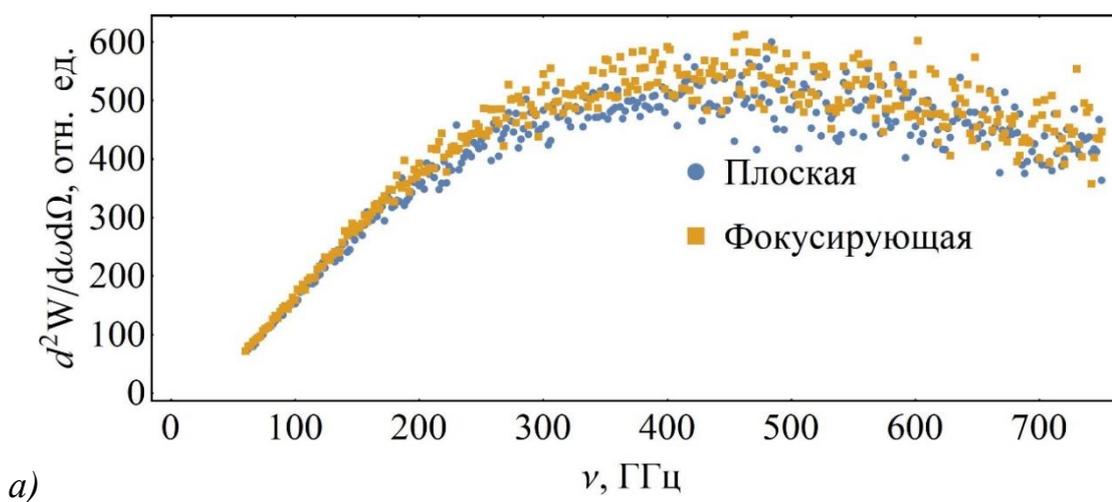
Оптимизация кода была направлена на увеличение скорости расчетов и их точности. Первые шаги, на основе которых осуществлялась оптимизация кода, сделаны по рекомендациям в статье [16]. У многих компьютеров переполнение оперативной памяти приводит к сильному снижению их производительности. Для избежания предотвращения этого, в код была добавлена функция, отвечающая за очистку памяти от вычисленных данных. Это позволило оптимизировать использование памяти вычислительного устройства, что поможет предотвратить уменьшение производительности в дальнейшем [17].

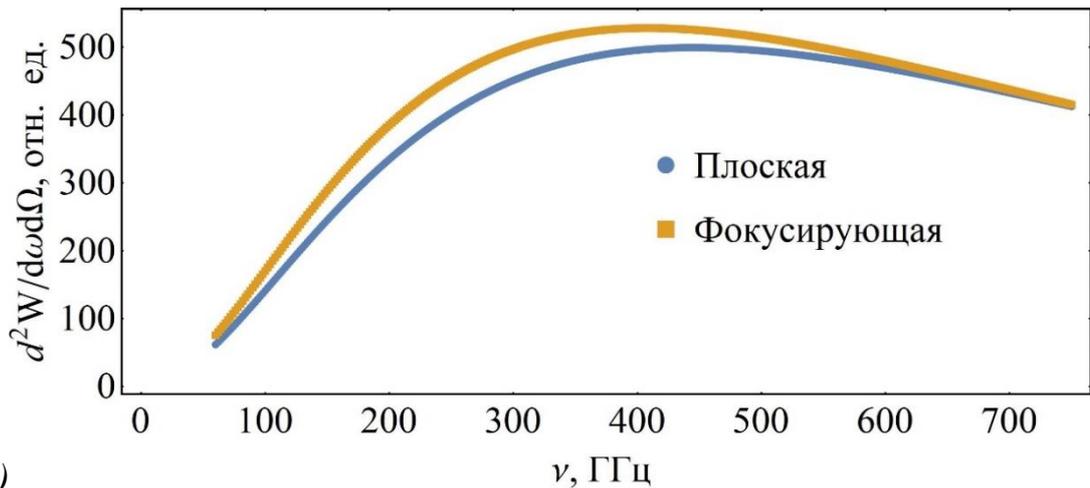
В языке *Wolfram Language* имеет большое значение понятие абсолютной точности. Ярким примером этого является иррациональное число π . При вычислениях его можно использовать с конкретной точностью (до необходимого порядка) или непосредственно как иррациональное число (с абсолютной точностью). Процессы вычисления при использовании абсолютной точности усложняются, тем самым уменьшая скорость вычисления [15, 17]. Также запись чисел с абсолютной точностью требует большей оперативной памяти. Поэтому из всех вычислений было убрана абсолютная точность, ограничившись машинной точностью. Таким образом, были исключены более громоздкие расчёты.

Основное вычисление характеристик ДИ в коде сводится к многократному интегрированию по поверхности мишени. Поэтому важнейшей частью оптимизации стало максимальное использование возможностей численного интегрирования, реализованных в *Wolfram Mathematica*. Функция *NIntegrate* [15] при стратегии "GlobalAdaptive" по умолчанию стремится найти аналитическое (символьное) значение интеграла, что значительно увеличивает время расчета, а также влияет на точность результатов. Символьное решение зачастую нереализуемо для большинства геометрий мишеней. Для устранения

данной проблемы была использована опция "SymbolicProcessing", которая позволяет отключить все символьные расчеты. Данное решение значительно ускорило расчёты, а также устранила множество ошибок (а более точно, предупреждений), связанных с невозможностью определения аналитического решения.

До оптимизации кода применение стратегии "GlobalAdaptive" было ограничено для криволинейных мишеней, поэтому необходимо было использовать более времязатратный метод Монте-Карло, который также имеет проблемы с получением нужной точности расчетов (необходимость большой выборки точек). Оптимизация расширила варианты мишеней, для которых стратегия интегрирования "GlobalAdaptive" является оптимальной. Однако для сложной геометрии и для расчётов с большей кратностью интегрирования метод Монте-Карло является наилучшим. Для наглядного примера результатов оптимизации на рис. 5 представлены спектры от плоской и фокусирующей мишеней, рассчитанных до оптимизации кода (методом Монте-Карло) и после ("GlobalAdaptive"). Параметры моделирования и геометрия мишеней идентично в обоих случаях. Как видно из сравнения рис. 5а и рис. 5б оптимизация позволила добиться увеличения точности расчетов с одновременным уменьшением затрачиваемого времени.





б)

Рисунок 5 – Сравнение рассчитанных спектров, полученных до оптимизации (а) и после оптимизации (б) кода

Что касается времени расчётов (на 6 ядрах), до оптимизации для плоской и фокусирующей оно составило 411 и 1811 секунд, соответственно. После оптимизации эти значения составили 111 и 394 секунд, соответственно. Стоит упомянуть, что в 1-ой же версии кода была реализована возможность производить параллельные расчеты на нескольких ядрах. В свою очередь расчеты на ядрах можно также разделять на потоки. Возможность параллельных расчетов – это одна сильных сторон Wolfram Mathematica.

1.6 Верификация кода

Для верификации кода было проведено сравнение результатов моделирования дифракционного излучения с экспериментальными данными, представленными в различных научных публикациях. В статье [18] представлены данные эксперимента по наблюдению оптического дифракционного излучения от одной пластины (см. рис. 6а). Параметры эксперимента были следующими: энергия электронов $E_e = 1280$ МэВ, угол наклона мишени $\psi = 45^\circ$, размеры мишени 8×8 мм², прицельный параметр $h = 41$ мкм, спектральный диапазон чувствительности детектора 300 – 650 нм. Для моделирования были рассчитаны угловые распределения интенсивности дифракционного излучения для 4 различных длин волн (300, 400, 500, 600 нм), после чего с учётом чувствительности детектора (рис. 6б) [19] было получено

среднее распределение. На рис. 6в представлено сравнение результатов моделирования (для случая горизонтальной компоненты поляризации) с экспериментальными данными.

Из сравнения видно, что максимумы интенсивности излучения в эксперименте и в моделировании практически совпадают. Характер поведения графиков идентичен друг другу. Отличие лишь заключается в ширине кривых, экспериментальная кривая более широкая в отличие от кривой моделирования. Это объясняется тем, что в модели не учитывается апертура детектора, то есть детектор являлся точечным. Так как в реальности детектор имеет размеры, то это приводит к уширению углового распределения интенсивности ДИ. Ширина на полувысоте в эксперименте составила 2.7, а в расчете 2.1 (76% от экспериментальной).

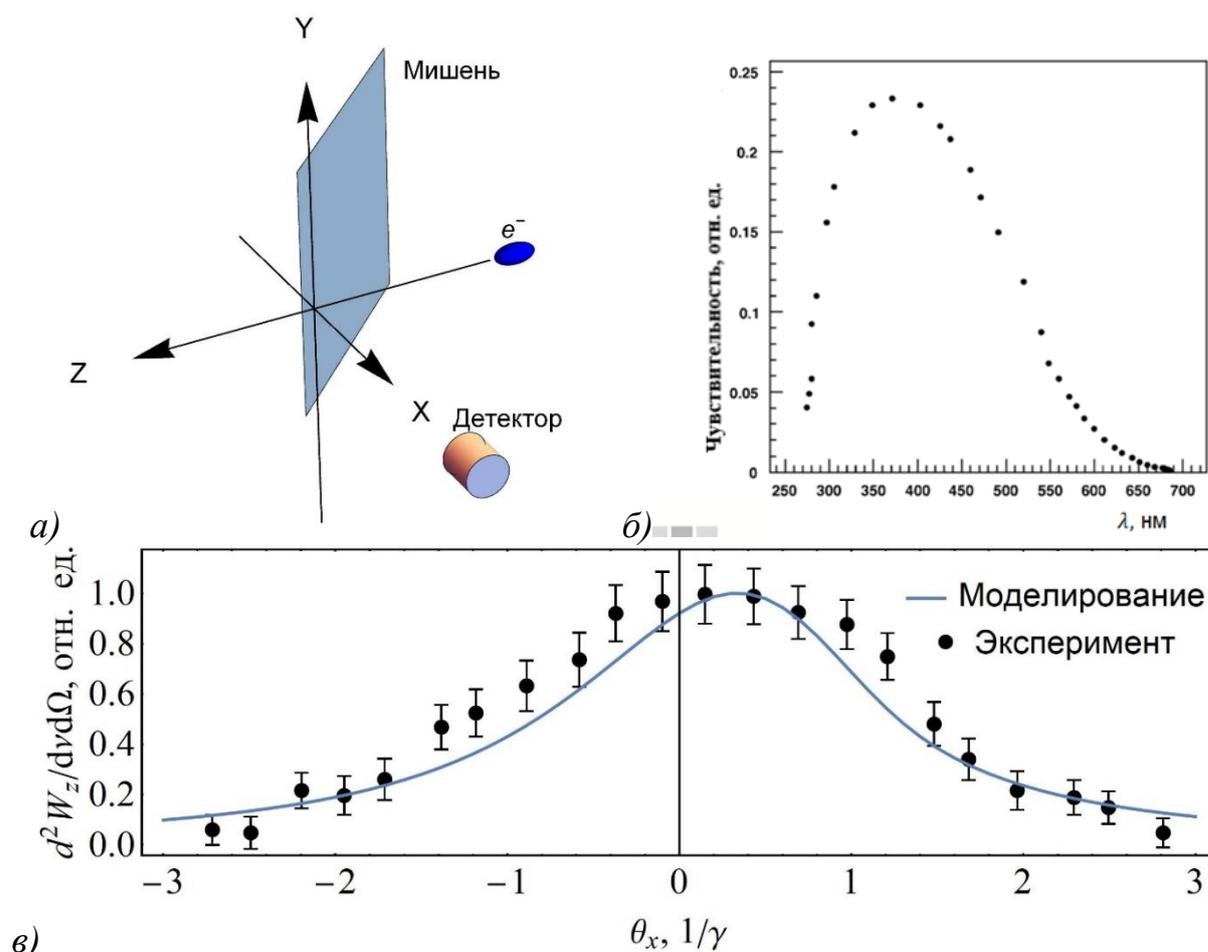


Рисунок 6 – Схема эксперимента (а), чувствительность детектора (б) [19], результаты эксперимента и моделирования (в)

В статье [20] представлены данные эксперимента по наблюдению оптического дифракционного излучения от щелевой мишени (см. рис. 7а). Измерения проводились на том же ускорителе, что и в статье [18]. Параметры эксперимента были следующими: энергия электронов $E_e = 1280$ МэВ, угол наклона мишени $\psi = 45^\circ$, размеры мишени 7×9 мм², ширина щели 0.26 мм. Излучение перед попаданием на детектор проходило через фильтр на 550 нм. Также в эксперименте были получены характеристики переходного излучения от этой мишени. В этом случае электронный пучок проходил через одну из пластин мишени примерно на расстоянии 1.4 мм от края щели (см. рис. 7б).

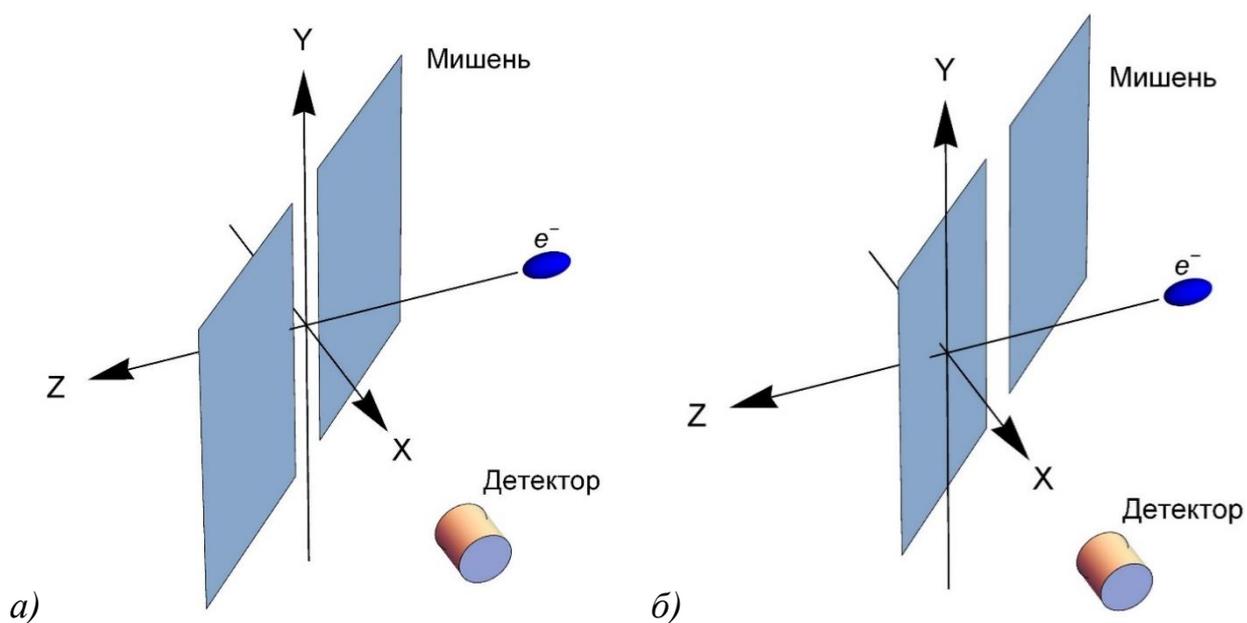


Рисунок 7 – Схема эксперимента с дифракционным (а) и переходным (б) излучением

На рис. 8а представлено сравнение спектрально-угловых распределений дифракционного излучения, полученных в эксперименте и в моделировании. Детектор в этом случае двигался вдоль оси OZ (см. рис. 7а), а электронный пучок проходил через центр щели, то есть без смещения. Наблюдается хорошее совпадение полученных результатов. Характеры поведения экспериментальных точек и расчетной кривой идентично. Существуют лишь незначительные отличия в виде небольшого уширения и смещения экспериментальных пиков, что, скорее всего, связано с тем, что в моделировании не учитывается апертура детектора.

Сравнение экспериментальных данных переходного излучения с моделированием (рис. 8б) демонстрирует меньшее совпадение. Однако моделирование показывает важные черты в спектрально-угловом распределении, которые обнаруживаются и в эксперименте. Например, это асимметрия пиков, которая наблюдается в эксперименте и в моделировании, и она идентична. Также совпадает характер спада пиков. Различие наблюдается в ширине пиков и их положении, что также объясняется апертурой детектора. Нельзя исключать и влияние размеров сгустка, что не учитывалось в моделировании.

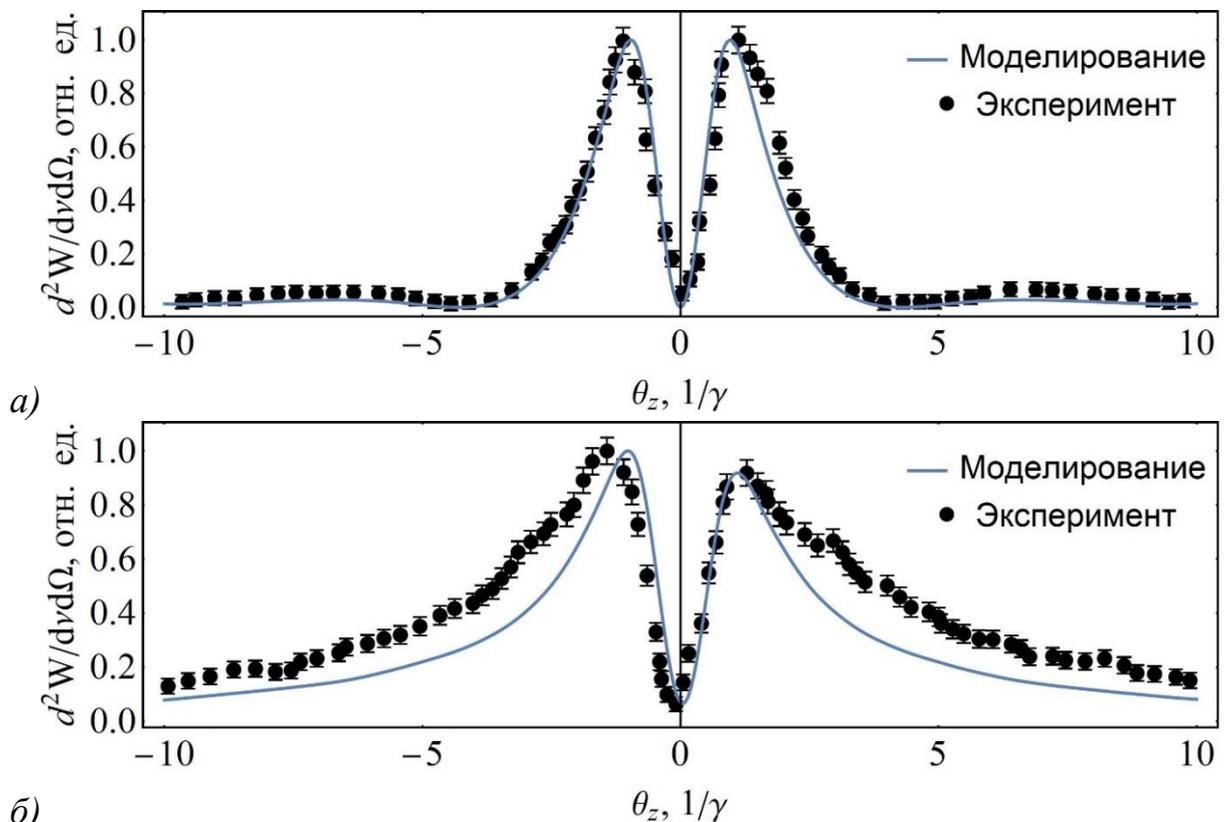


Рисунок. 8 – Спектрально-угловые распределения дифракционного (а) и переходного (б) излучения в моделировании и в эксперименте

Также в данной статье были представлены спектрально-угловые распределения вдоль вертикальной оси (OY) (в статье обнаружены опечатки в подписях осей графиков с экспериментальными данными) при различных смещениях пучка от центра щели (рис. 9). При сравнении с моделированием данных результатов наблюдается относительно хорошая сходимость результатов. В моделировании и в эксперименте пики симметричны. В

эксперименте при увеличении смещения электронного пучка наблюдалось увеличение интенсивности излучения, что также было зафиксировано в моделировании, однако пропорции увеличения интенсивности в эксперименте (в 2 раза) и моделировании (в 1.5 раза) не совпали, что, скорее всего, связано с не учётом размеров сгустка и распределения плотности заряда в нем. Стоит также обратить внимание на изменение интенсивности в минимуме углового распределения, оно увеличивается с увеличением смещения пучка, что отражено и в эксперименте, и в моделировании (см. рис 9б).

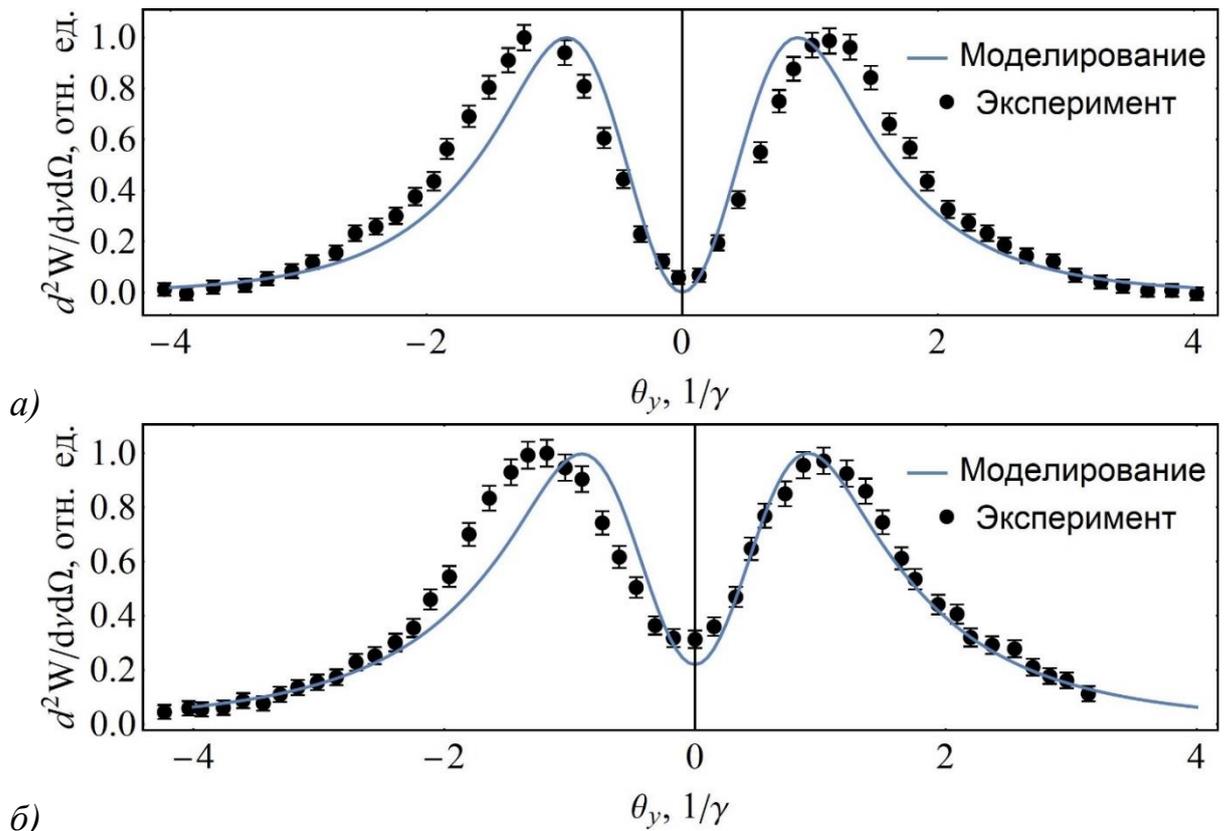


Рисунок. 9 – Спектрально-угловые распределения дифракционного излучения вдоль оси OY при смещении пучка на 3.5 мкм (а) и 53 мкм (б)

Из проведённого сравнения экспериментальных данных, взятых из научных статей, с результатами моделирования можно утверждать, что созданный код работоспособен и хорошо описывает закономерности, наблюдаемые в реальных экспериментах.

1.7 Задачи на будущее

Созданный код не является законченным продуктом и имеет необходимость дальнейшего развития, поэтому существует ряд задач, направленных на увеличение возможностей программы:

- Добавление возможностей учета апертуры детектора;
- Добавление возможностей учета размеров сгустков;
- Добавление возможности проведения расчетов от мишеней из диэлектрических материалов;
- Добавление возможности учета влияния оптических систем (например, линзы) на генерируемое излучение.

Учет влияния апертуры детектора можно реализовать с помощью дополнительного интегрирования по поверхности детектора. Для этого можно представлять детектор как плоскую поверхность нужной формы. Учет влияния размеров сгустков в нынешней версии кода частично реализован с помощью форм-фактора, однако данный метод не универсален. Больше возможностей дает учёт размеров сгустка с помощью геометрического региона. В этом случае сгусток задаётся областью с нужным распределением плотности заряда, по которой в дальнейшем производится интегрирование. Однако введение дополнительных интегрирований по регионам при учете апертуры детектора и размеров сгустка может значительно увеличить время расчётов, поэтому при реализации необходим компромисс между точностью и временем расчётов.

Обобщённый метод поверхностных токов не позволяет производить расчеты от мишеней с диэлектрическими свойствами, поэтому для расширения вариантов возможных материалов мишени необходимо в коде реализовать применение других методов, например, метод поляризационных токов. Учёт оптических систем является довольно специфической задачей, привязанной к конкретной установке. Поэтому данная задача наименее актуальна в данный момент. Что касается реализации, то это можно сделать с помощью аналитических функций, используемых в оптике, или также с добавлением дополнительного интегрирования (например, по поверхности линзы).

2. Свойства терагерцового излучения от решётки, генерируемого релятивистским электронным пучком

Всё электромагнитное излучение условно принято делить на диапазоны частот, границы которых довольно расплывчаты и определяются множеством факторов (свойствами излучения, областью применения данного диапазона, основными источниками и т.д.). Большинство видов электромагнитного излучения активно используются в различных областях деятельности человека. Однако существует терагерцовый диапазон частот излучения, лежащий в области от 0.1 до 10 ТГц (длина волны от 3 до 0.03 мм), который охватывает коротковолновую часть миллиметрового диапазона, также весь субмиллиметровый и часть дальнего инфракрасного диапазона. Под терагерцовым диапазоном подразумевают область частот от 0.1 до 10 ТГц (длина волн от 3 до 0.03 мм). В английской терминологии этот диапазон называют терагерцовым пробелом (terahertz gap), тем самым указывая на слабое развитие технологий манипуляции и излучения волн данных частот. В отличие от соседей по спектру, генерация терагерцового излучения и сегодня остается сложным и дорогим процессом [21]. Однако данный диапазон имеет большой потенциал применения, благодаря ряду свойств при взаимодействии с веществом.

Вследствие малой энергии квантов терагерцовое излучение практически не ионизирует биологические объекты, т.е. не разрушает их и является безопасным для живых организмов, и оно может быть применено для выявления патологий и инородных образований методами терагерцовой томографии [22]. Терагерцовое излучение обладает высокой проникающей способностью, что нашло применение в сфере безопасности [23]. Также терагерцовое излучение представляет интерес в области спектрометрии и материаловедения [22].

Существуют различные способы генерации ТГц излучения [21, 22], однако продолжают исследоваться и развиваться новые способы. Один из таких способов это применение электронного ускорителя с умеренно релятивистской энергией частиц в пучке, состоящего из коротких сгустков. При длине сгустков

< 0.1 мм излучение в ТГц диапазоне будет когерентным, т.е. его интенсивность будет пропорциональна N^2 , где N – количество частиц в сгустке.

Данная глава посвящена исследованию на основе моделирования свойств ТГц излучения, генерируемого с помощью механизма дифракционного излучения (ДИ) от металлической решётки, на предмет возможности создания регулируемого (перестраиваемого) источника излучения. Первые модели периодических мишеней (в частности решётки), реализованные в созданном коде, были представлены на конференции [24]. А непосредственно сами результаты исследования решётки на применимость в качестве источника терагерцового излучения были частично представлены в работе [25].

2.1 Основные параметры моделирования

Спектральные свойства излучения исследовались с помощью моделирования, которое в дальнейшем сравнивалось с экспериментальными данными, полученными на ускорителе LUCX [26]. Численный код, используемый в моделировании, более подробно описан в главе 1. Расчёт спектральных характеристик ДИ проводился с помощью метода Монте-Карло [15]. Расчёты проводились для решётки, состоящей из 15 периодов с профилем, образуемым прямоугольным треугольником. Все параметры решётки указаны на рис. 10а. В моделировании электроны с энергией 8 МэВ движутся вдоль оси Z , расходимость пучка не учитывалась. Точечный детектор находится на расстоянии 5 м на оси X ($Y = Z = 0$) (см. рис. 10б).

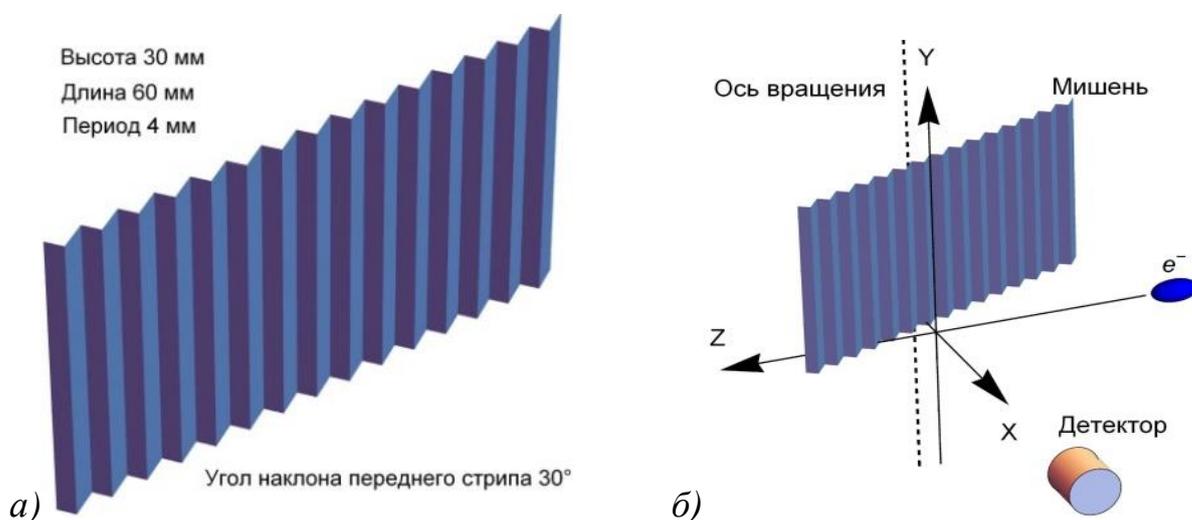


Рисунок 10 – Решётка (а), схема взаимодействия (б)

Решётка может поворачиваться вокруг оси вращения на заданный угол θ (расстояние от оси вращения до передней грани решётки 9.73 мм). Вертикальный прицельный параметр и горизонтальный прицельный параметр при $\theta = 0^\circ$ равны 0.5 мм. Добавим, что зависимость интенсивности ДИ от угла наклона решётки θ к траектории пучка называется ориентационной зависимостью.

В расчёте учитывалось влияние размеров гауссового сгустка ($\sigma_z = 0.15$ мм) на спектр излучения [27], с помощью форм-фактора, который представлен на рис. 11. Как видно, происходит быстрый спад форм-фактора, и к 600 ГГц фактически равен нулю. Значит, в области больших частот излучение будет отсутствовать, поэтому верхнюю частотную границу моделирования определим равной 600 ГГц. Нижнюю границу моделирования определим равной 50 ГГц, что немного меньше 1-го порядка дифракции (4 мм или 75 ГГц).

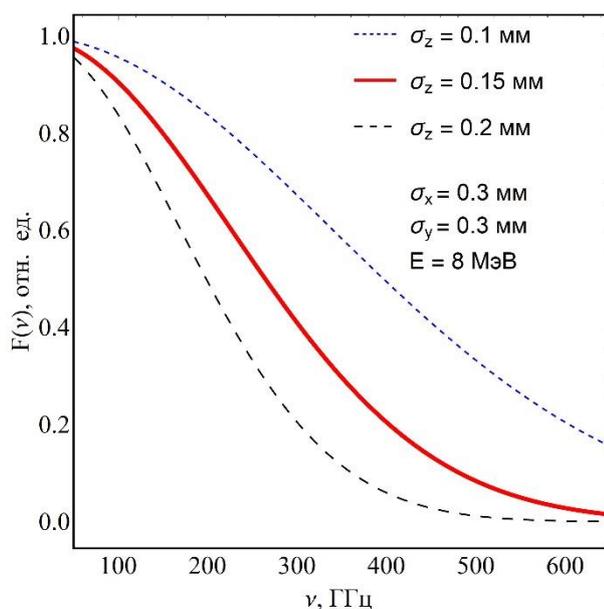


Рисунок 11 – Форм-фактор сгустка

Модель мишени в Wolfram Mathematica реализована составной. Стрипы параллельные первому (крайнему) стрипу по направлению движения пучка будем называть передними, а остальные задними. Передний и задний стрип образуют прямоугольно-треугольный профиль решётки. Совокупность передних и совокупность задних стрипов решётки могут рассчитываться независимо друг от друга, что можно использовать для ускорения расчетов. Для изучения вкладов

от передних и задних стрипов, а также выявления диапазона угла поворота решётки, при которых излучение отлично от фона, были произведены предварительные расчёты полных спектров при повороте решётки от 0° до 90° с шагом 10° . На рис. 12 представлены результаты для углов поворота решётки от 0° до 50° с шагом 10° . Как видно из предварительных расчетов, вклад суммарное излучение задних стрипов решётки незначителен. Например, для 1-го порядка интенсивность излучения меньше в 55 раз для угла наклона решётки 0° , в 65 раз для 10° и в 220 раз для 20° . Это объясняется тем, что задние стрипы развернуты в другую сторону по отношению к направлению движения электронов. Поэтому в дальнейших расчетах будем пренебрегать вкладом задних стрипов, что позволит ускорить расчеты примерно в два раза.

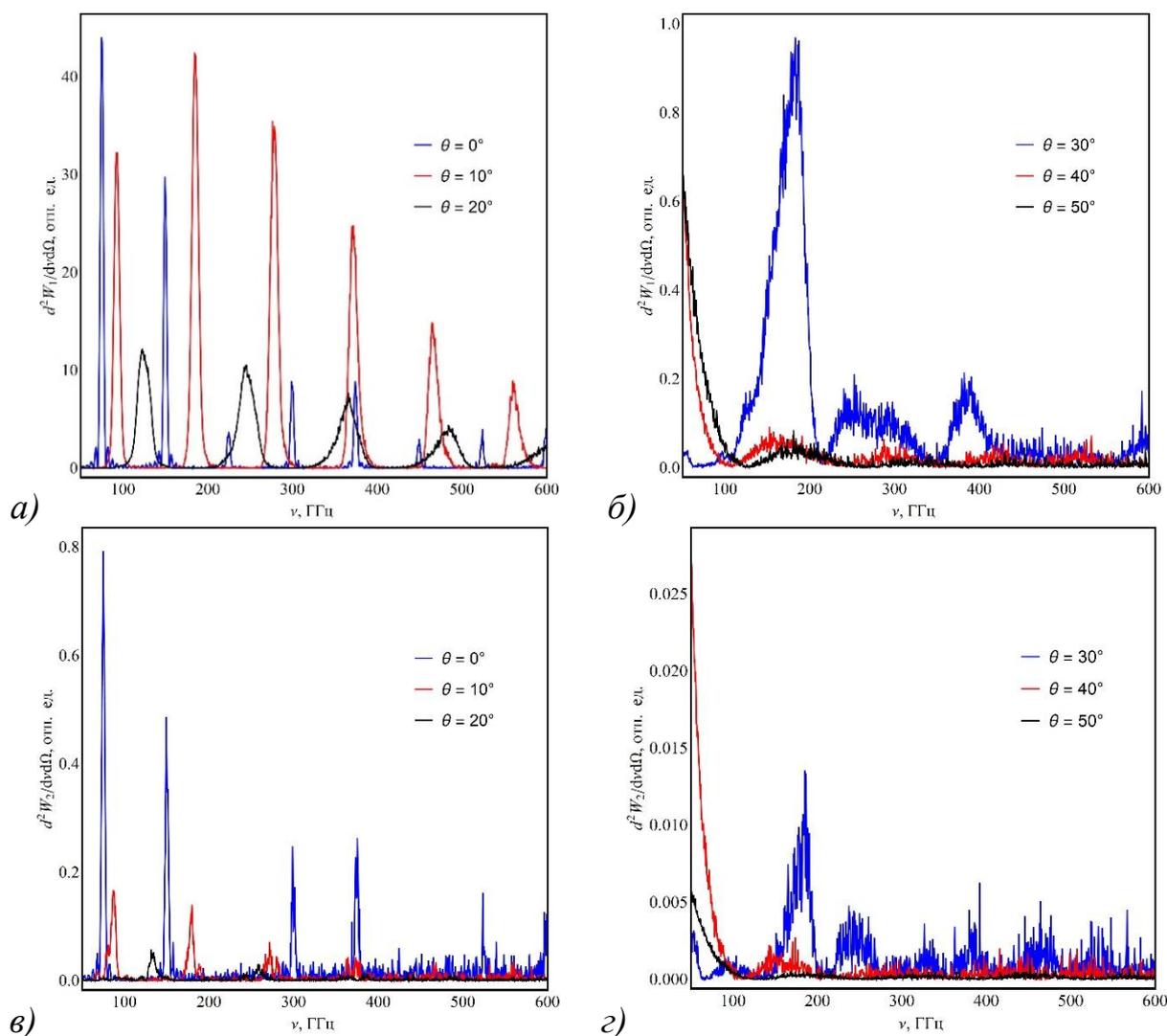


Рисунок 12 – Спектры от передних стрипов при разных углах θ (а, б), спектры от задних стрипов при разных углах θ (в, г)

Также было определено, что при углах поворота решётки более 30° интенсивность излучения в 40 и более раз меньше, что позволит ограничить угол поворота решётки до 30° и тем самым уменьшить количество расчётов.

2.2 Спектральные распределения

В ходе моделирования производился расчёт спектрального распределения для разных углов наклона решетки для двух компонент поляризации поля излучения: горизонтальной компоненты поляризации (вдоль оси OZ, см. рис. 10б) и вертикальной компоненты поляризации (вдоль оси OY). Рассматривать каждую компоненту по-отдельности важно, так как их спектры имеют различные характеры поведения, что представляет интерес с точки зрения создания источника. Поворот решётки осуществлялся от 0° до 30° с шагом 1° . При больших углах подробный расчёт не производился, так как предварительное моделирование показало, что для $\theta > 30^\circ$ интенсивность излучения крайне мала и потому не представляет интереса. Типичный спектр ДИ от решетки представляет собой набор из нескольких пиков, разделенных между собой (это разные порядки дифракции излучения на решётке). Порядки дифракции в спектре горизонтальной компоненты имеют свойство расщепляться, начиная с некоторых углов наклона мишени. Для вертикальной компоненты расщепление пиков не свойственно, однако существует небольшой диапазон углов, при которых можно наблюдать расщепление старших порядков дифракции. На рис. 13 для примера представлены результаты моделирования спектров для горизонтальной и вертикальной компонент для шести углов $\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ и 25° . Отметим еще раз, что все спектры, представленные здесь, рассчитывались с учётом влияния форм-фактора. Как видно вертикальная компонента вносит примерно в 5 раз больше вклад в суммарное излучение, если оценивать по максимальному значению интенсивности разных порядков дифракции. Поэтому без использования поляризационных фильтров (поляризаторов) характеристики излучения от решётки будут определяться именно вертикальной компонентой. Однако горизонтальная составляющая

имеет более сложный характер за счёт расщепления, что потенциально может иметь большее применение на практике. При нулевом угле поворота решётки нет расщепления пиков горизонтальной компоненты, при углах 2° - 3° начинается расщепление у высших порядков, а для первых порядков примерно с 4° - 5° . Для вертикальной компоненты расщепление наблюдалось лишь при углах 4° - 8° для порядков дифракции от 4-го и выше.

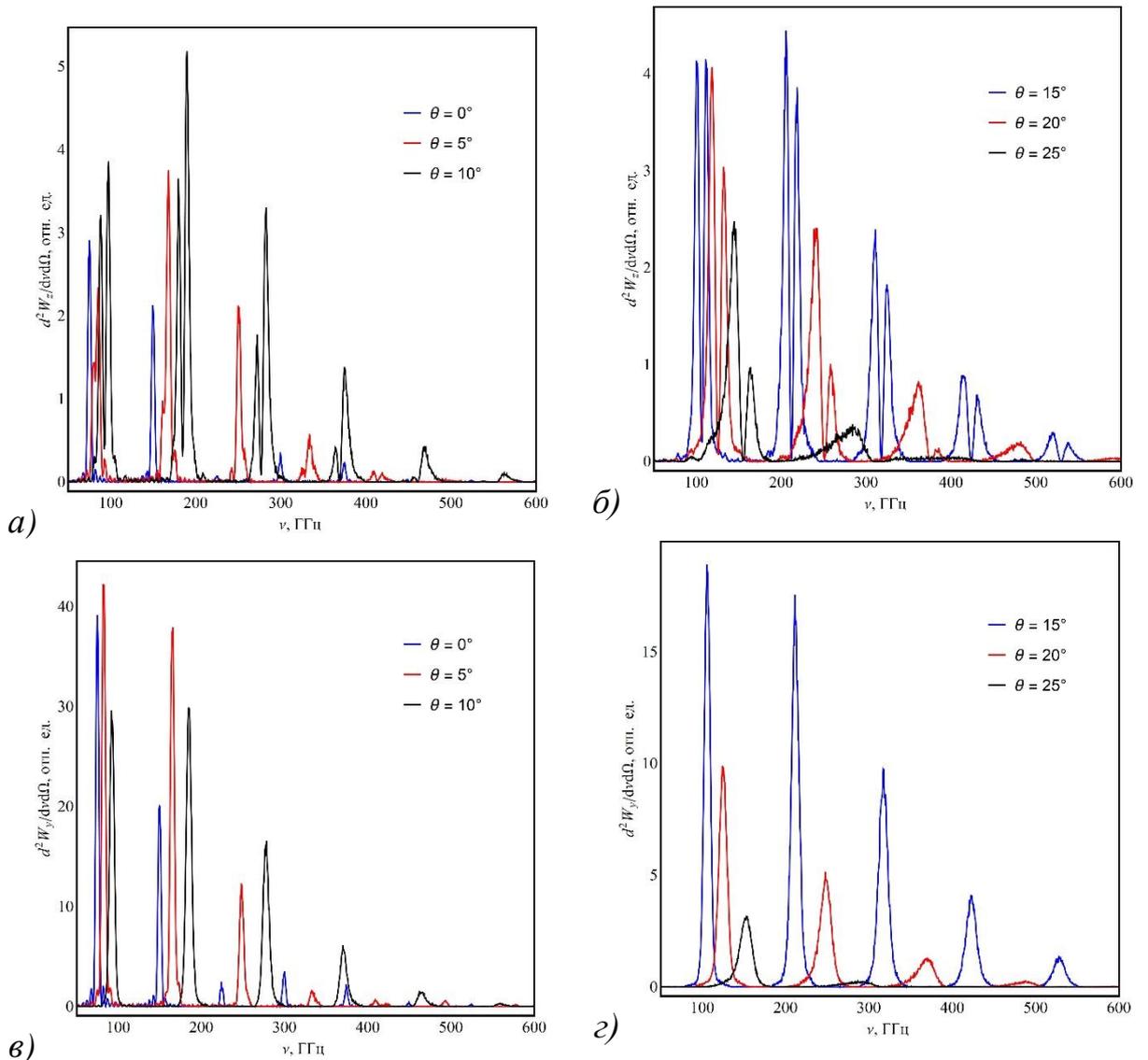


Рисунок 13 – Спектры горизонтальной компоненты (а, б), спектры вертикальной компоненты при разных углах θ (в, г)

Для оценки асимметрии расщепленных пиков ведём параметр асимметрии, который вычисляется по следующей формуле:

$$k_a = \frac{I_2 - I_1}{\max(I_1, I_2)} \quad (2.1)$$

где I_1 и I_2 - значение интенсивности в левом и в правом пике одного порядка.

В момент расщепления пиков их асимметрия максимальная, и параметр асимметрии фактически равен 1. При дальнейшем повороте решетки коэффициент асимметрии изменяется практически линейно (см. рис. 14). При $\theta = 14^\circ$ - 15° расщепленные пики становятся симметричными (параметр асимметрии равен 0), что объясняется тем, что передние полосы решетки наклонены под углом зеркального отражения (45°) по отношению к траектории электронов и направлением на точку наблюдения (детектор).

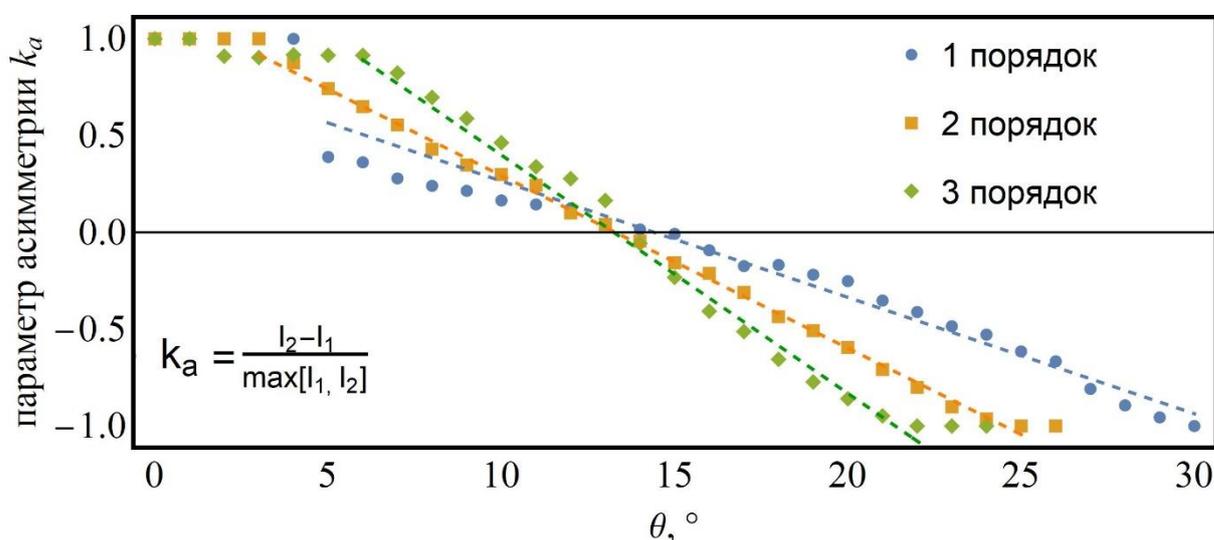


Рисунок 14 – Зависимость параметра асимметрии от угла наклона решётки

При больших углах начинают преобладать левые пики (с меньшей частотой), и коэффициент асимметрии достигает значения -1. Угол наклона линейной части в зависимости параметра асимметрии от θ увеличивается с ростом порядка дифракции, то есть асимметрия более быстро изменяется для высших порядков. Для первого порядка при угле наклона мишени 5° происходит резкий спад асимметрии. Предположительная причина этого в том, что расщепление происходит намного раньше, однако из-за слияния пиков мы не можем зафиксировать это. Резкое уширение пика, которое было зафиксировано при углах 2° - 5° подтверждает данную гипотезу (см. параграф 2.4).

2.3 Интенсивность генерируемого излучения

Зависимость интенсивности излучения в максимуме для обеих компонент поляризации представлена рис. 15. Данная зависимость имеет максимум при определенных углах, при этом угол, на который приходится максимум, зависит также от порядка дифракции. Наблюдается закономерность: чем больше порядок дифракции, тем больше угол, на который приходится максимум интенсивности.

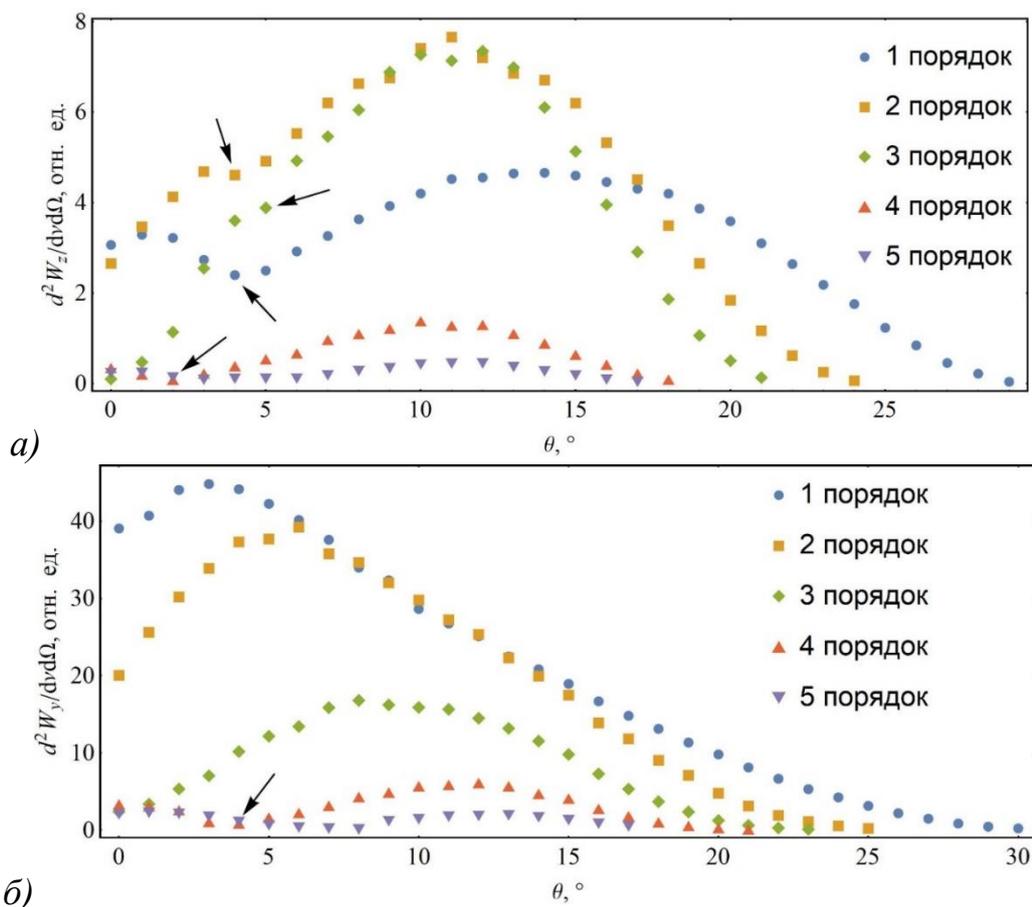


Рисунок 15 – Зависимость интенсивности излучения в максимуме от угла наклона решётки для горизонтальной (а) и вертикальной компоненты (б)

Для вертикальной компоненты после достижения максимума в дальнейшем наблюдается практически линейный спад интенсивности, что особенно выражено для первых порядков дифракции. Как отмечалось ранее, у вертикальной составляющей для порядков от 4-го и выше наблюдается расщепление пиков при углах 4° - 8° . На рис. 15б это явление отражено провалом в интенсивности в данном промежутке (стрелка на рис.15б).

Для горизонтальной компоненты расщепление также отражено в спадах интенсивности в момент расщепления пиков (см. рис. 15а) за счет перераспределения энергии между расщепленными пиками (указаны стрелками на этом рисунке). Положение максимумов у вертикальной и горизонтальной составляющей различны. У горизонтальной компоненты поляризации положения максимумов смещены в область больших углов. Поэтому вклад горизонтальной составляющей будет расти с увеличением угла наклона решётки. Также стоит отметить, что у вертикальной составляющей в большом промежутке (6° - 16°) углов излучение 1-го и 2-го порядка дифракции практически равны.

2.4 Частотные характеристики излучения

Из спектров рис. 13 видно, что с увеличением угла наклона положение пиков смещается в область более высоких частот. Данную закономерность аналитически описывает дисперсионное соотношение [28], которое связывает частоту максимума данного порядка с углом наклона решётки (для фиксированного угла наблюдения). Однако данное соотношение, не учитывает множество факторов, поэтому реальное излучение имеет немного отличную закономерность. К подтверждению этому, на основании результатов моделирования были получены зависимости частоты пиков горизонтальной и вертикальной составляющей от угла наклона решётки для первых пяти порядков спектра (рис. 17).

На рис. 17 пунктирными линиями изображено дисперсионное соотношение, и как видно, оно не способно описать положение максимумов для горизонтальной компоненты поляризации после расщепления, однако довольно хорошо описывает положение минимумов между двумя пиками одного порядка. Для вертикальной составляющей при больших углах наклона решётки положение максимумов значительно отклоняется от дисперсионного соотношения. Также для данной компоненты показано расщепление 4-го и 5-го порядка в диапазоне углов 4° - 8° , и также как для горизонтальной составляющей дисперсионное соотношение указывает на положение минимума.

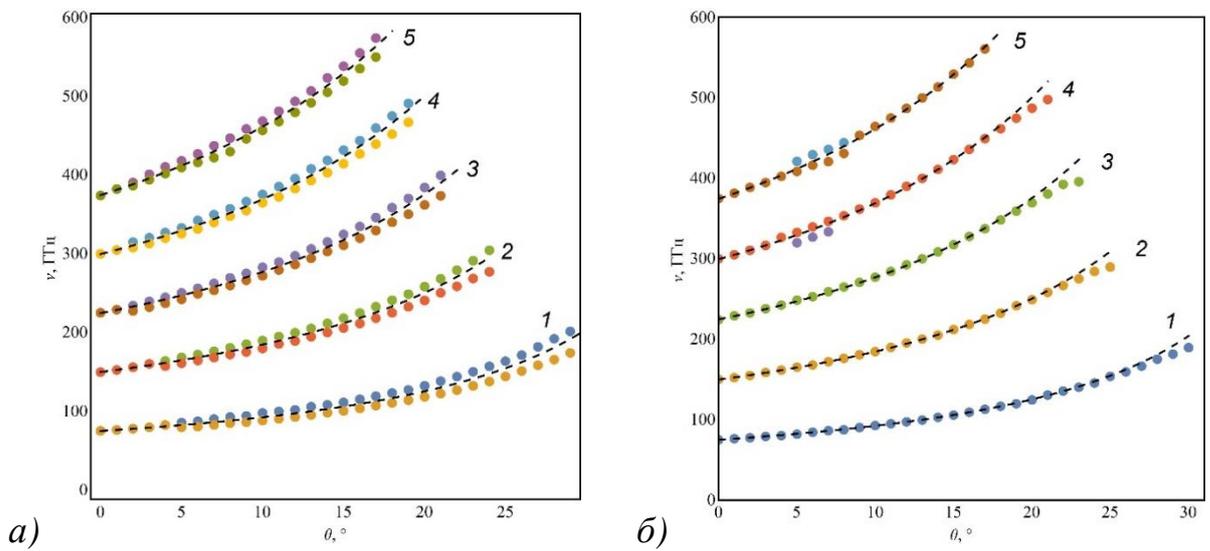


Рисунок 17 – Зависимости частоты пиков от угла наклона решётки для горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты

Одной из важнейших характеристик любого источника является монохроматичность. Для ее оценки были рассчитаны ширина на полувысоте и относительная ширина пиков, которая определяется как соотношение ширины на полувысоте к частоте, соответствующей положению максимума пика. На рис. 18 представлены зависимости абсолютной ширины на полувысоте от угла наклона решётки. У горизонтальной компоненты для расчетов были взяты расщеплённые пики с меньшей частотой (левые пики).

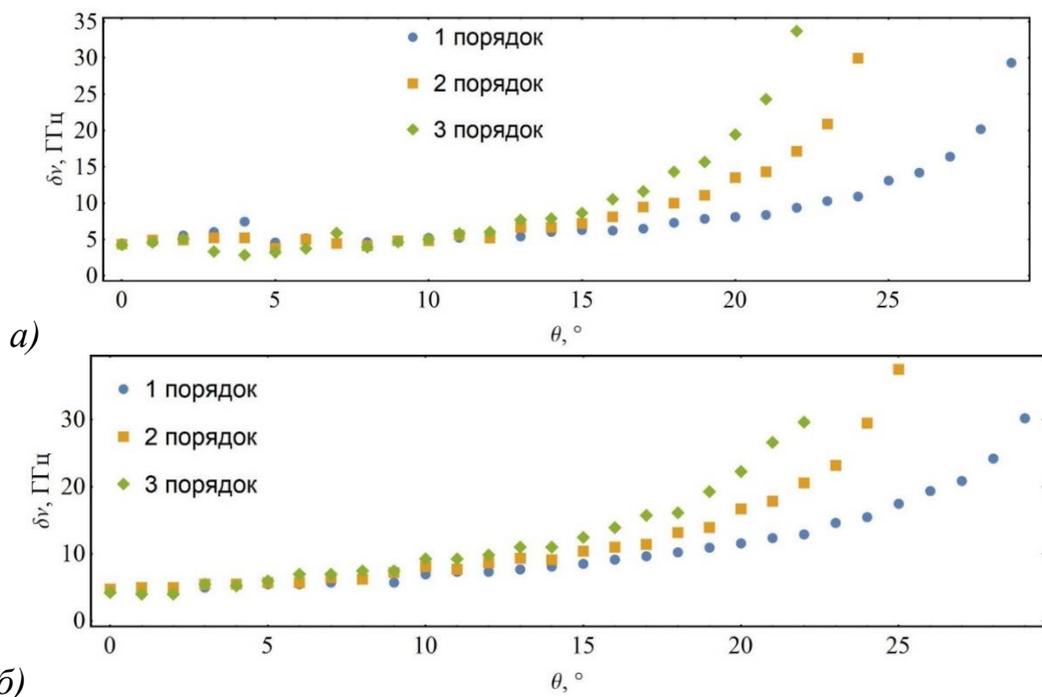


Рисунок 18 – Зависимость ширины пика от угла наклона решётки для горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты

Для обеих поляризаций наблюдается медленный рост ширины пиков с увеличением угла наклона. Однако начиная примерно с 20° наблюдается быстрое уширение пиков, предполагаемая причина которого – изменение положения максимума углового распределения ДИ с поворотом решётки, а также уменьшение количества эффективных периодов решётки с которыми взаимодействует кулоновское поле сгустка.

На рис. 19 представлены зависимости относительной ширины от угла наклона решетки для горизонтальной и вертикальной компоненты поляризации. Для горизонтальной компоненты у расщепленных порядков был взят пик с меньшей частотой (левый), характер поведения для правых пиков аналогичен. Из зависимости видно, что относительная ширина пиков очень слабо зависит от угла наклона решётки вплоть до 24° - 26° (для первых трёх порядков), а при больших углах происходит резкое уширение, что обусловлено тем, что максимум углового распределения сильно отдалился от положения детектора, а также уменьшением количества эффективных периодов решётки.

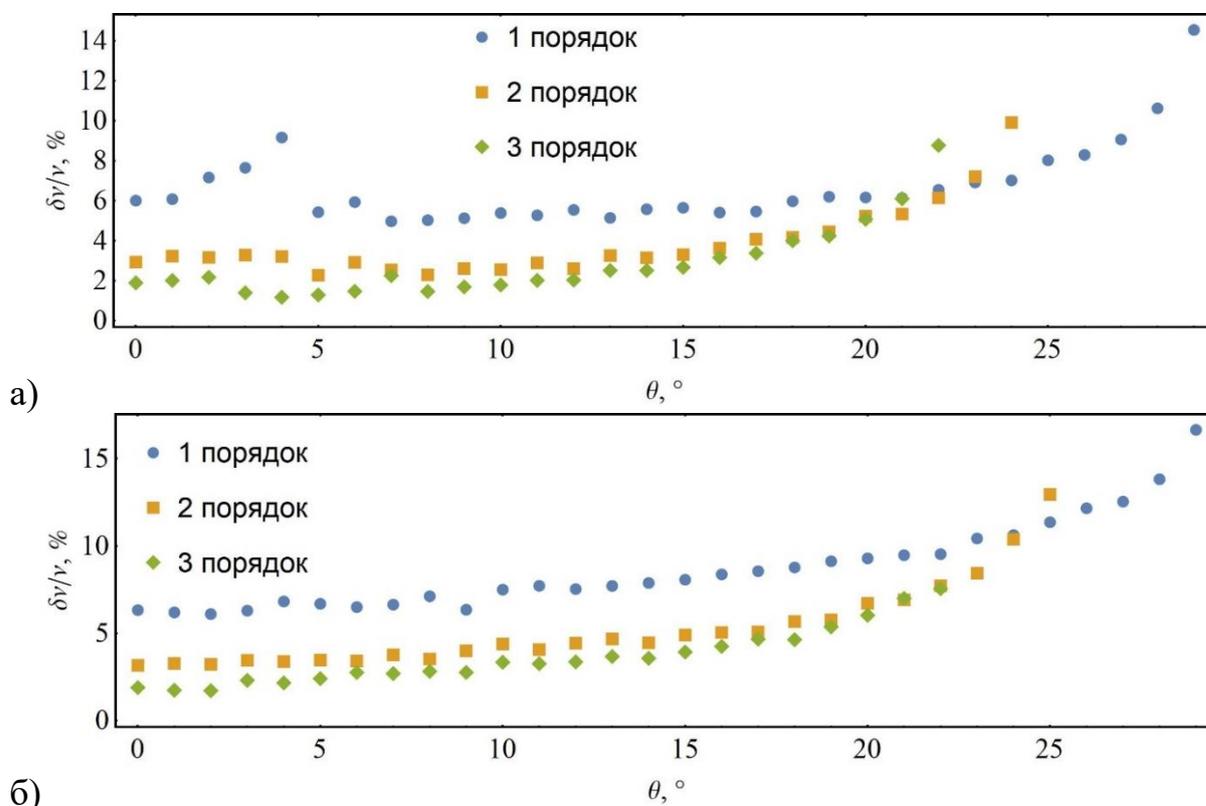


Рисунок 19 – Зависимость относительной ширины пика от угла наклона решётки для горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты

Относительная ширина пиков уменьшается с ростом порядка, для первых трёх порядков она примерно равна 6, 4 и 2% соответственно. Характер монохроматичности для горизонтальной и вертикальной компонент фактически одинаков, однако у горизонтальной составляющей в первом порядке дифракции наблюдается уширение пика до фиксируемого в моделировании момента расщепления. Предположительно данный всплеск обусловлен тем, что расщепление происходит раньше, но из-за близкого расположения расщепленных пиков, они сливаются в один уширенный пик, что немного портит монохроматичность излучения.

2.5 Сравнение с экспериментальными данными

Как уже отмечалось, моделирование проводилось для параметров ускорителя LUCX (Япония) [26], на котором ранее проводился эксперимент по исследованию излучения от данной решётки в описанной выше геометрии. Результаты эксперимента представлены были в докладе [29]. Сразу отметим, что в данной работе для измерения спектров использовался ряд детекторов, работающих в разных частотах, рассматриваемого терагерцового диапазона (от 50 ГГц до 600 ГГц). В ходе эксперимента не удалось охватить весь диапазон частот, ввиду отсутствия всех необходимых детекторов, затрагивающие все частоты в этом диапазоне.

На рис. 20 представлено наложение экспериментальных данных (черные точки) на дисперсионные кривые для вертикальной и горизонтальной компоненты, полученных в результате моделирования. Касательно горизонтальной компоненты, результаты эксперимента полностью подтверждают расщепленный характер пиков. Однако, у некоторых пиков в эксперименте не было зафиксировано расщепление: для 1-го и 3-го порядка дифракции при 17° . Предполагаемая причина этого недостаточная разрешающая способность используемого интерферометра. Для 1-го порядка при 17° была зафиксирована относительная ширина в 21.9%, что сильно отлично от остальных

экспериментальных результатов. Такое уширение явно связано, с тем, что пики на спектре слились в один пик, что также объясняет отсутствие расщепления.

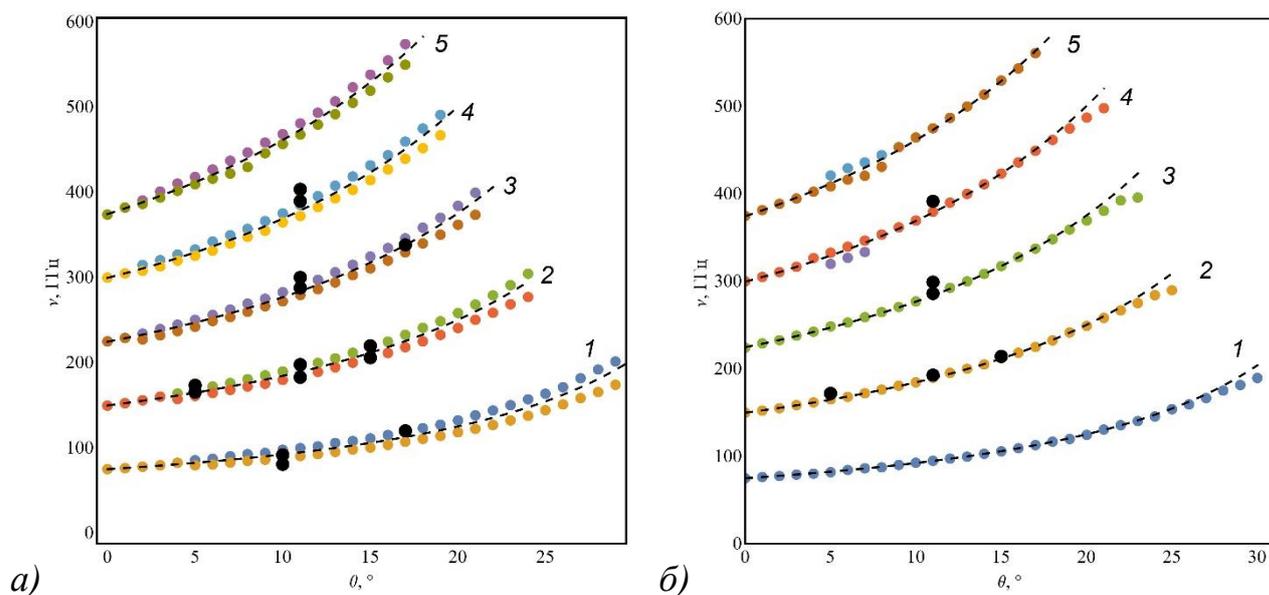


Рисунок 20 – Сопоставление зависимости частоты пиков от угла наклона решётки для горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты с экспериментальными данными (черные точки)

Очень хорошее наложение экспериментальных данных на результаты моделирования демонстрирует 2-ой порядок, чуть хуже с 1-ым и 3-им порядками. Для 3-го и 4-го порядков горизонтальной компоненты фиксируются смещение положение пиков в область более высоких частот. Данные результаты получены одним детектором, что позволяет сделать предположение о том, что есть возможные некоторые неточности при восстановлении спектров из измеренной интерферограммы.

Для вертикальной компоненты 3-го и 4-го порядков дифракции также наблюдается смещение экспериментальных данных, полученных тем же детектором. Остальные точки имеет хорошее совпадение с результатами моделирования.

Для сравнения характера изменения асимметрии пиков в эксперименте и моделировании, был взят 2-ой порядок горизонтальной компоненты поляризации, так как по нему имеется наибольшее число экспериментальных точек. На рис. 21 представлено сравнение поведения параметра асимметрии из

эксперимента и моделирования. Хотя мы имеем 3 экспериментальных точки, но по ним можно констатировать линейный характер изменения параметра асимметрии пиков при повороте решётки. Однако экспериментальная прямая пересекает ось абсцисс при меньшем угле (10°), по сравнению с моделированием, то есть в эксперименте симметрия пиков достигается при меньших углах.

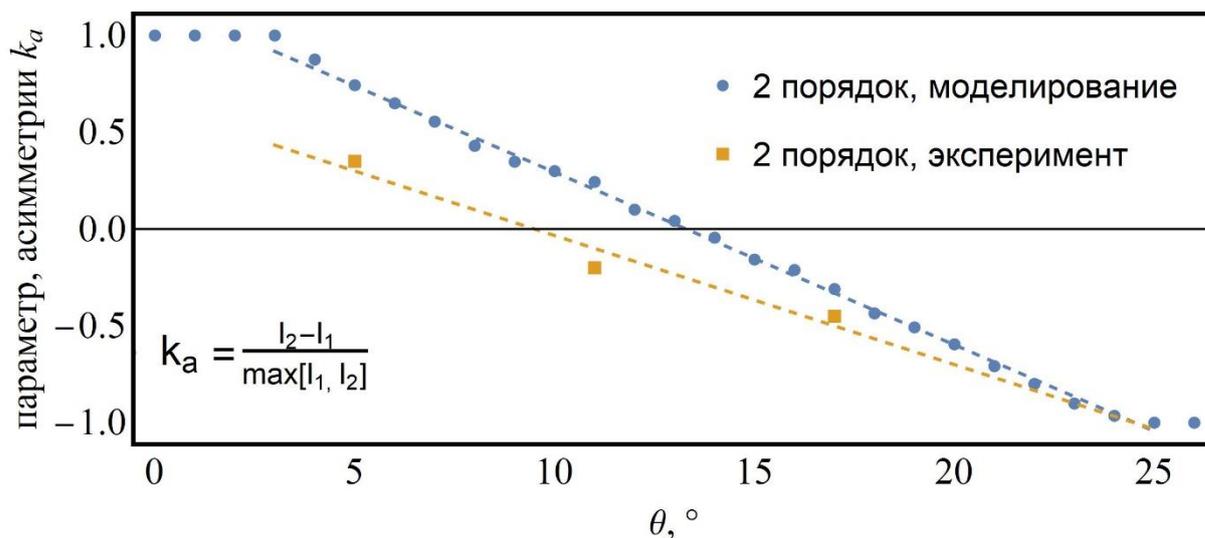


Рисунок 21 – Зависимость параметра асимметрии от угла наклона решётки

На рис. 22 и 23 представлены сравнения абсолютной и относительной ширины пиков, полученных в эксперименте и в моделировании для 2-го порядка дифракции обеих компонент поляризации. Был взят 2-ой порядок, так как он имеет наибольшее число экспериментальных точек, как у вертикальной, так и у горизонтальной компоненты. Как и ожидалось, ширина пиков в эксперименте больше чем в моделировании, что связано с тем, что при вычислениях не учитывалась апертура детектора. В целом характер поведения экспериментальных и расчетных точек одинаковый: наблюдается небольшое увеличение ширины пиков с ростом угла наклона решётки.

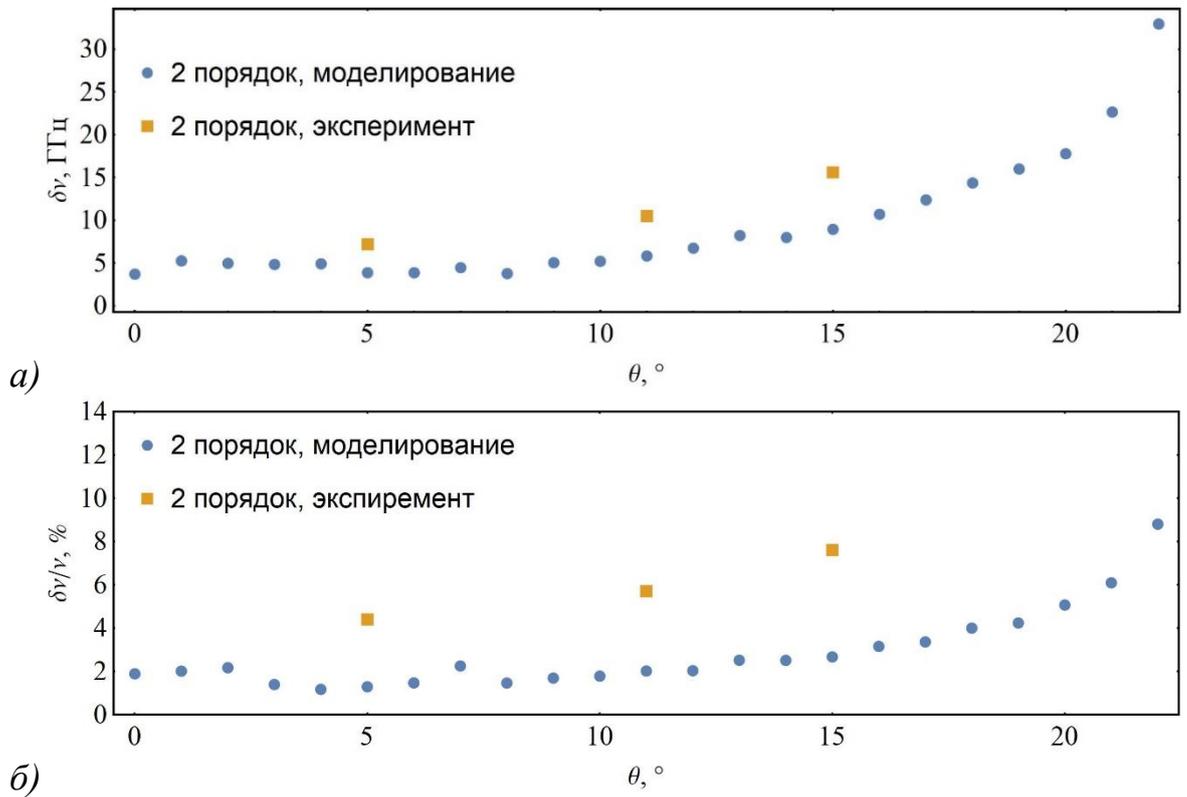


Рисунок 22 – Зависимость абсолютной (а) и относительной (б) ширины пика от угла наклона решётки в эксперименте и в моделировании для 2 порядка горизонтальной компоненты

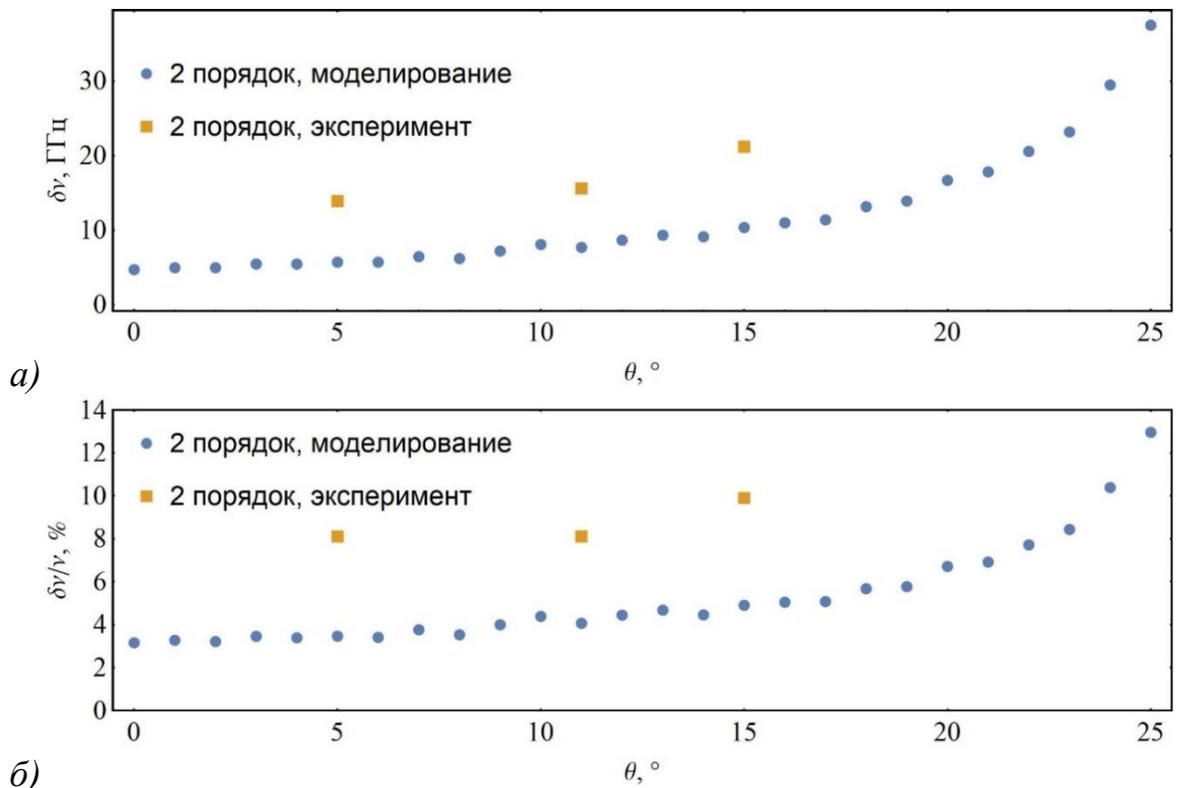


Рисунок 23 – Зависимость абсолютной (а) и относительной (б) ширины пика от угла наклона решётки в эксперименте и в моделировании для 2 порядка вертикальной компоненты

2.6 Выводы по главе

Из проведённого анализа результатов моделирования были получены зависимости спектральных характеристик терагерцового излучения от угла поворота решётки, которые подтверждают возможность создания хорошо регулируемого источника на основе механизма ДИ. Генерируемое излучение имеет минимум 5 порядков дифракции, а с учетом поляризационных компонент и свойства расщепления пиков у горизонтальной составляющей имеем минимум 15 пиков с высокой монохроматичностью. При этом данные пики могут смещаться фактически во всем рассматриваемом диапазоне только за счет поворота решётки. Монохроматичность излучения также частично поддается регулированию за счет выделения нужных порядков дифракции. Суммарная энергия генерируемого излучения, также поддается регуляции с помощью поворота решётки. Сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента показывает в целом хорошее совпадение, однако существуют некоторые расхождения эксперимента от моделирования, требующие дополнительных исследований. Таким образом, при использовании решётки в качестве источника терагерцового излучения можно регулировать: энергию, интенсивность и монохроматичность излучения. Регулирование непосредственно можно производить с помощью поворота мишени, выделением нужного порядка дифракции излучения и выбором нужной поляризации.

3. Генерация электромагнитного излучения с помощью механизма дифракционного излучения от криволинейных поверхностей

Данная глава посвящена созданию криволинейных мишеней и исследованию свойств генерируемого от них дифракционного излучения. В качестве таких объектов рассматриваются спиральная (геликоидальная) и фокусирующая (параболическая) мишень. Геликоидальная мишень предлагается для генерации закрученного излучения. Параболическая мишень предлагается использовать для фокусировки генерируемого излучения без использования оптических систем. Сама реализация данных мишеней демонстрирует широкие возможности созданного кода, написанного на языке Wolfram Language.

3.1 Моделирование свойств "закрученного" излучения, генерируемого электронами от спиральной мишени

В настоящее время представляет большой интерес изучение «закрученных» фотонов и создание источников для их генерации [30]. Круг применения данного вида излучения представляется большим, начиная от радиоволн для передачи информации [31], заканчивая диагностикой свойств пучков заряженных частиц ускорителей или различных материалов.

«Закрученные» фотоны – это фотоны, обладающие не нулевой проекцией момента импульса на ось, направленной вдоль поступательного движения частицы [30]. Другими словами, фотон совершает не только поступательное движение, но и вращательное. Вращательное движение дает дополнительные две степени свободы для частицы, что влияет на процессы взаимодействия с веществом. Данное уникальное свойство применимо для диагностики свойств вещества, с помощью пропускания через него закрученного излучения. Вследствие поступательного движения волновой фронт такого электромагнитного излучения будет иметь форму геликоида.

На данный момент существует малое количество схем получения закрученных фотонов [30], и большинство работают в оптическом диапазоне. Схемы генерации в оптическом и терагерцовом диапазоне в целом идентичные: плоские волны, генерируемые обычными источниками, проходя через

различные оптические системы, становится на выходе «закрученными». Это производится различными средствами: дифракционными решётками (рис. 24б), спиральными фазовыми пластинками (рис. 24а), пространственными модуляторами и т.д. [1].

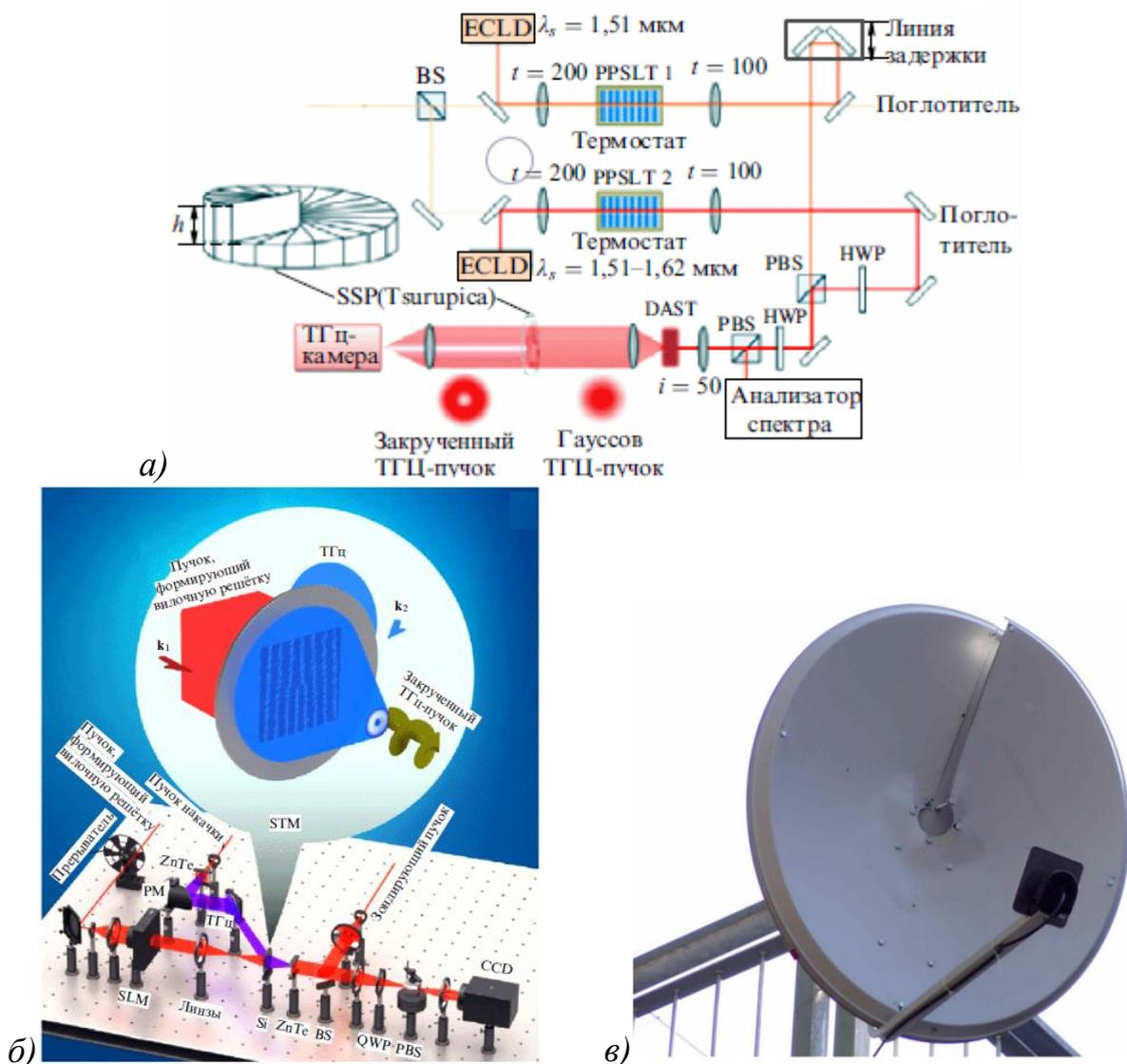


Рисунок 24 – Существующие схемы генерации закрученного излучения: с помощью спиральной фазовой пластинки (а) [30], с помощью вилочной дифракционной решётки (б) [30] и с помощью геликоидальной параболической «тарелки» (в) [31]

Стоит отметить, что данные схемы зачастую сложные и очень чувствительные, что сильно ограничивает их применимость. В радиоволнах закручивания удалось добиться с помощью обычной параболической «тарелки» (рис. 24в), которую разрезали по радиусу, а затем отогнули кромки,

чтобы получить один шаг спирали [31]. На практике закрученные фотоны в других частотах пока не удалось реализовать, но существует механизм генерации закрученного излучения вплоть до рентгена с помощью спирального ондулятора. Генерация фотонов с большими энергиями теоретически представляется возможным с помощью обратного комптоновского рассеивания, однако она почти не реализуема из-за необходимости соблюдения множества условий.

В данной работе предлагается использовать новую схему генерации закрученных фотонов с помощью механизма дифракционного излучения. Дифракционное излучение (ДИ) [1] это вид поляризационного излучения, возникающего вследствие пролёта заряженной частицы вблизи некоторой неоднородности. В качестве такой неоднородности предлагается использовать мишень в форме геликоида с осевым отверстием. Данная мишень позволит генерировать закрученные фотоны, например, в когерентном режиме в зависимости от длины сгустков в электронном пучке, за пределами оптического диапазона. Целью данного раздела в этой главе является подбор оптимальных размеров для предложенной мишени в рамках подготовки эксперимента на микротроне ТПУ с энергией электронов 6.1 МэВ. Часть полученных результатов были опубликованы в сборнике [32] по итогам конференции.

3.1.1 Геометрия геликоида

Геликоид – это поверхность, образованная в результате поступательно-вращательного движения отрезка вдоль одной оси (см. рис. 25). Данная поверхность задается системой параметрических уравнений [33], которая имеет вид:

$$\begin{cases} x = \rho \cos[\varphi] \\ y = \rho \sin[\varphi] \\ z = \frac{h \varphi}{2\pi} \end{cases} \quad (3.1)$$

где ρ – расстояние точки до оси Z ; φ – параметр, имеющий смысл угла вращения относительно оси Z ; h – константа, определяющая ширину между витками геликоида.

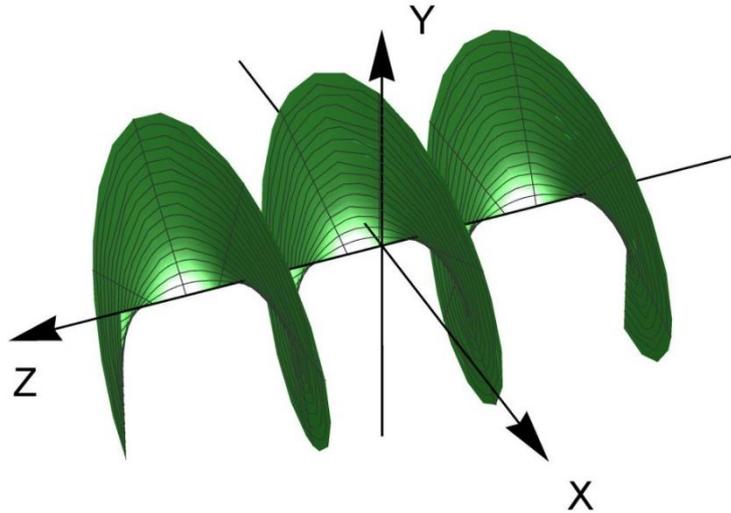


Рисунок 25 – Геликоид (три периода, $\rho = 0 \div \rho_{max}$)

Координаты единичного вектора нормали для поверхности, заданной в параметрическом виде, определяются по следующей формуле [34]:

$$\vec{n} = \frac{r(x, y, z)'_{\rho} \times r(x, y, z)'_{\varphi}}{|r(x, y, z)'_{\rho} \times r(x, y, z)'_{\varphi}|} \quad (3.2)$$

Расписав векторное произведение, получим следующую формулу:

$$\vec{n} = \frac{\left\{ \left| \frac{D(y, z)}{D(\rho, \varphi)} \right|, \left| \frac{D(z, x)}{D(\rho, \varphi)} \right|, \left| \frac{D(x, y)}{D(\rho, \varphi)} \right| \right\}}{\sqrt{\left| \frac{D(y, z)}{D(\rho, \varphi)} \right|^2 + \left| \frac{D(z, x)}{D(\rho, \varphi)} \right|^2 + \left| \frac{D(x, y)}{D(\rho, \varphi)} \right|^2}} \quad (3.3)$$

$$\left| \frac{D(y, z)}{D(\rho, \varphi)} \right| = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial \rho} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial z}{\partial \rho} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} \end{vmatrix}, \quad \left| \frac{D(z, x)}{D(\rho, \varphi)} \right| = \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial \rho} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial x}{\partial \rho} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \end{vmatrix}, \quad \left| \frac{D(x, y)}{D(\rho, \varphi)} \right| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \rho} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial y}{\partial \rho} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \end{vmatrix}$$

Тогда нормированный вектор нормали для геликоида будет иметь вид:

$$\vec{n} = \frac{2\pi}{\sqrt{h^2 + 4\pi^2\rho^2}} \left\{ \frac{h \sin[\varphi]}{2\pi}, -\frac{h \cos[\varphi]}{2\pi}, \rho \right\} \quad (3.4)$$

Выразим параметры ρ и φ через координаты геликоида:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi = \frac{2\pi z}{h} \end{cases} \quad (3.5)$$

Тогда окончательная формула для задания нормированной нормали будет иметь вид:

$$\vec{n} = \frac{2\pi}{\sqrt{h^2 + 4\pi^2(x^2 + y^2)}} \left\{ \frac{h \sin\left[\frac{2\pi z}{h}\right]}{2\pi}, -\frac{h \cos\left[\frac{2\pi z}{h}\right]}{2\pi}, \sqrt{x^2 + y^2} \right\} \quad (3.6)$$

3.1.2 Задание спиральной мишени

Спиральная мишень задается с помощью уже рассмотренной системы уравнений геликоида с введением ограничений на параметры ρ и φ :

$$\begin{cases} x = \rho \cos[\varphi] \\ y = \rho \sin[\varphi] \\ z = \frac{h \varphi}{2\pi} \\ R_1 \leq \rho \leq R_2 \\ -\frac{3\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Таким образом, мишень имеет 3 основных параметра: внутренний R_1 и внешний R_2 радиусы и ширину шага разрыва h . Параметр φ изменяется на 2π , тем самым выделяя один полный виток геликоида (один период). На рис. 26а представлена схема генерации закрученного ДИ. Частным случаем геликоида при $h=0$ является кольцо (см. рис. 26б), дифракционное излучение от которой хорошо изучено. Поэтому в дальнейшем результаты моделирования от кольца будут использованы в качестве реперных точек.

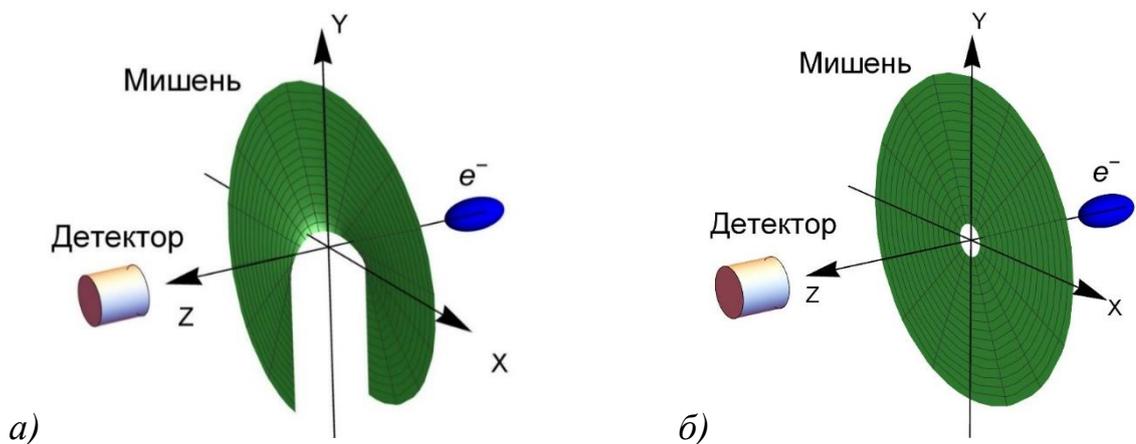


Рисунок 26 – Схема генерации от спиральной (а) и кольцевой мишени (б)

В созданном коде спиральная мишень реализована с помощью функции ParametricRegion[] [14]. Однако следует отметить, что данная функция Wolfram

Mathematica не способна полностью задать геликоид, из-за сложности геометрии и существовании особых точек, кратных π . При попытке целиком задать мишень, не задаются области вблизи особых точек, что подтверждается сравнением с расчётами площади кольца и геликоида. Геликоид и кольцо с одинаковыми радиусами по определению должны иметь одинаковые площади поверхности. Однако в области разрывов значения площади у геликоида значительно превышало нужные значения, за счет чего площадь геликоида зачастую превышал в несколько раз площадь кольца, с теми же параметрами. Однако, разбив геликоид на несколько частей и объединив их, можно получить мишень, у которой влияние особых точек меньше погрешности вычислений (меньше 5%). При этом стоит отметить, что сектора мишени не должны пересекать точки разрыва, так как они имеют характер точек разрыва второго рода. При пересечении данных точек происходит скачкообразное увеличение площади мишени в данной области. У заданной мишени существует две линии особых точек, поэтому рекомендуется использовать 6 секторов для задания мишени, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Границы секторов мишени.

№ сектора	Границы по углу φ , рад	
1	особая точка $\frac{-\pi}{2}$	$0.9 \cdot \frac{-\pi}{2}$
2	$0.9 \cdot \frac{-\pi}{2}$	$0.9 \cdot \frac{\pi}{2}$
3	$0.9 \cdot \frac{-\pi}{2}$	особая точка $\frac{\pi}{2}$
4	особая точка $\frac{\pi}{2}$	$1.1 \cdot \frac{\pi}{2}$
5	$1.1 \cdot \frac{\pi}{2}$	$0.9 \cdot \frac{3\pi}{2}$
6	$0.9 \cdot \frac{3\pi}{2}$	особая точка $\frac{3\pi}{2}$

На ниже представленных рисунках (рис. 27а-б) изображены визуализации мишени, а также вектора нормали при разных расстояниях от оси Z. Из данной

визуализации видно, что чем дальше от оси геликоида, тем он более плоский, тем больше он схож с мишенью в виде кольца.

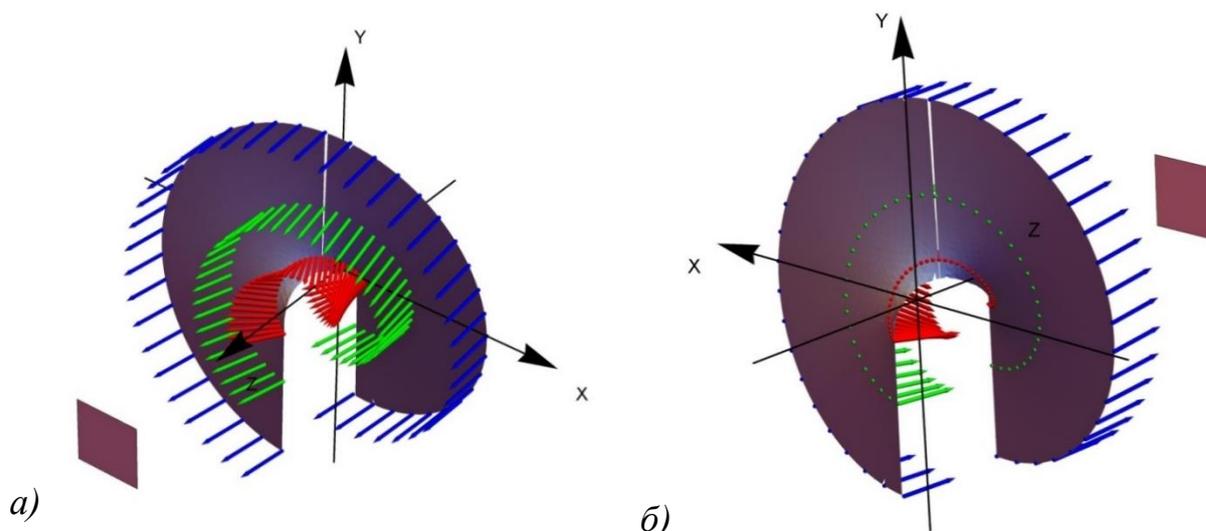


Рисунок 27 – Визуализация мишени и нормалей к ней: вид спереди (а) и вид сзади (б)

3.1.3 Описание задачи

В модели электрон движется через отверстие в мишени (геликоиде) вдоль оси Z (см. рис. 27). Рассматриваемое излучение генерируется в переднюю полусферу и сосредоточено в основном в узком конусе. Геликоид имеет 3 основных параметра: внутренний R_1 и внешний R_2 радиусы и ширину шага разрыва h . Регулируя радиусы геликоида, можно подбирать необходимый диапазон спектра излучения. Ограничения спектра связаны с размерами выражением:

$$\lambda_{min,max} = \frac{R_{1,2}}{\gamma} \quad (3.8)$$

где λ – длина волны излучения, γ – Лоренц-фактор.

Моделирование излучения производилось на основе ранее написанного кода (глава 1). Данный численный код основан на математической модели, полученной с помощью обобщённого метода поверхностных токов (является частным случаем метода поляризационных токов для мишеней с идеальной проводимостью), и написан на языке Wolfram Language. Используемый метод накладывает ограничения на скользящий пролёт пучка (рис. 2), что в свою

очередь ограничивает минимальное и максимальное значение параметров R_1 и h , соответственно. Используя выведенное ограничение (1.14) для энергии электронов 6.1 МэВ (энергия слабо влияет в релятивистских областях) и уравнение нормали геликоида (3.4), была получена зависимость минимального значения внутреннего радиуса геликоида (исходя из ограничений метода) от частоты при разных шагах разрыва (см. рис. 28). Данная зависимость имеет линейный характер. Для терагерцового диапазона ограничения незначительны, например, это именно сотые доли мм для 3 ТГц. Таким образом, в большинстве случаев непосредственно поперечные размеры сгустка будут накладывать ограничения.

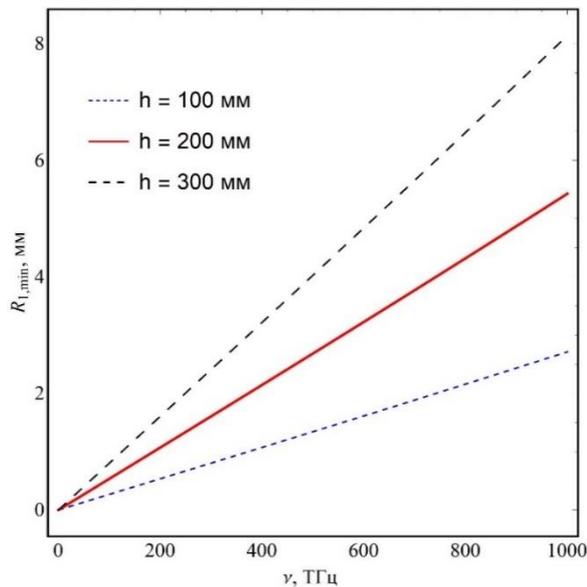


Рисунок 28 – Зависимость минимального значения внутреннего радиуса геликоида от частоты при разных шагах разрыва

В настоящей работе численное интегрирование производилось методом Монте-Карло. Размеры мишени и параметры моделирования были подобраны исходя из характеристик микротрона ТПУ. Для попадания максимума спектра ДИ в область характерных частот (~ 10 - 20 ТГц), после серии расчётов R_1 и R_2 были взяты 10 и 200 мм, соответственно. Шаг разрыва геликоида первоначально был выбран равным 105 мм исходя из разумных габаритов мишени. Данные размеры мишени находятся в пределах применимости метода, используемого в моделировании. Детектор в модели был расположен на расстоянии 6 м от центра

геликоида. Для сравнения расчёт также был сделан для кольца (совпадает с геликоидом при $h = 0$) с теми же радиусами. В ходе моделирования производились расчёты угловых распределений интенсивности ДИ в двух сечениях: в вертикальной (вдоль оси ОУ) и в горизонтально (вдоль оси ОХ), в максимуме которых рассчитывались спектральные распределения интенсивности ДИ.

3.1.4 Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 29 и 30 представлены спектрально-угловые распределения ДИ от геликоида вдоль осей ОХ и ОУ для горизонтальной и вертикальной компоненты поля. Сильная разница между компонентами говорит о том, что излучение в направлении оси ОХ и ОУ поляризовано. Однако в направлении ОХ вертикальная компонента не является нулевой в отличие от горизонтальной компоненты вдоль оси ОУ.

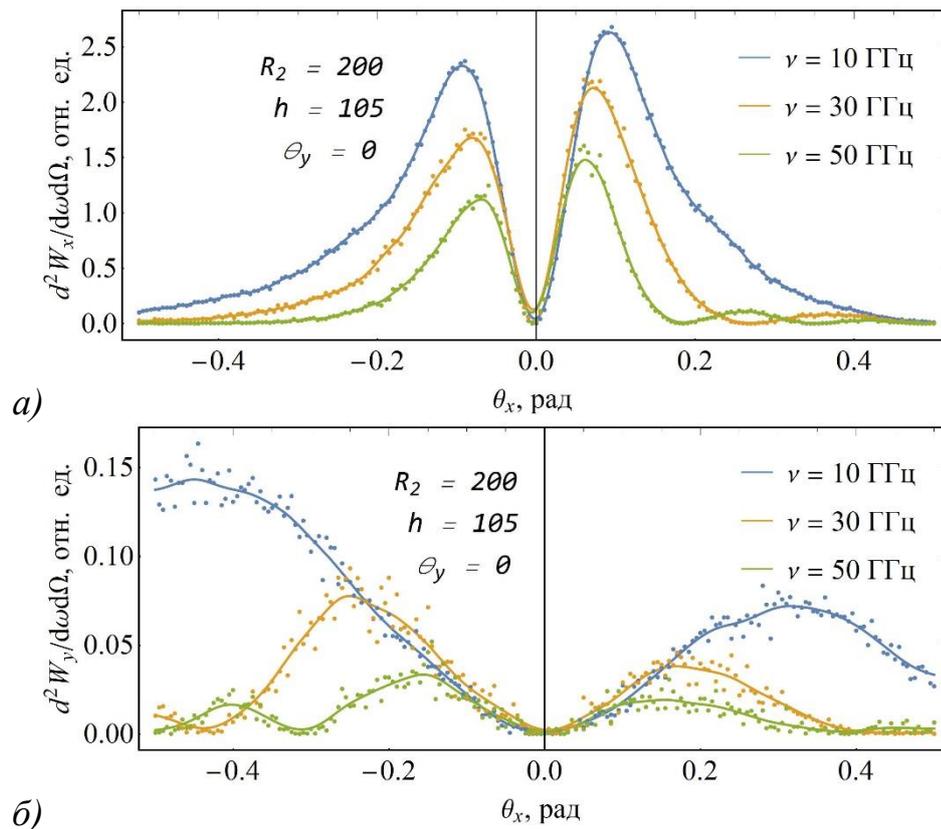


Рисунок 29 – Спектрально-угловые распределения ДИ от геликоида для горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты поля излучения вдоль оси ОХ

Также в распределении вдоль оси ОХ наблюдается асимметрия пиков, при этом она отсутствует вдоль оси ОУ, что предположительно обусловлено,

большей асимметричностью левой и правой части мишени, чем верхней и нижней части (см. рис. 26). Положения пиков в угловых распределениях вдоль осей ОХ и ОУ идентичны на соответствующих частотах. С уменьшением частоты возрастает интенсивность в максимуме, а угловое распределение излучения становится более широким.

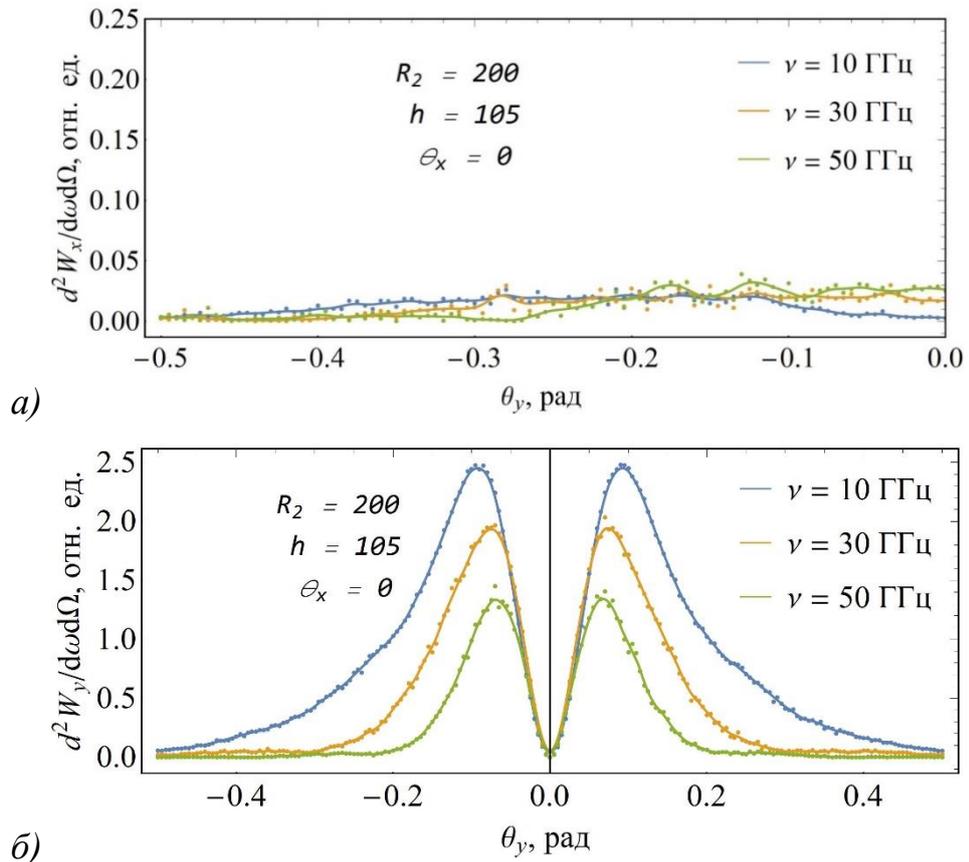


Рисунок 30 – Спектрально-угловые распределения ДИ от геликоида для горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты поля излучения вдоль оси ОУ

Также были рассчитаны распределения интенсивности ДИ от кольца вдоль осей ОУ и ОХ (рис. 31) для обеих компонент поляризации. В обоих случаях отсутствует асимметрия пиков, что обусловлено полной симметричностью геометрии кольца. Компонента поля перпендикулярная направлению движения детектора в обоих случаях фактически нулевая, что также было обнаружено у геликоида.

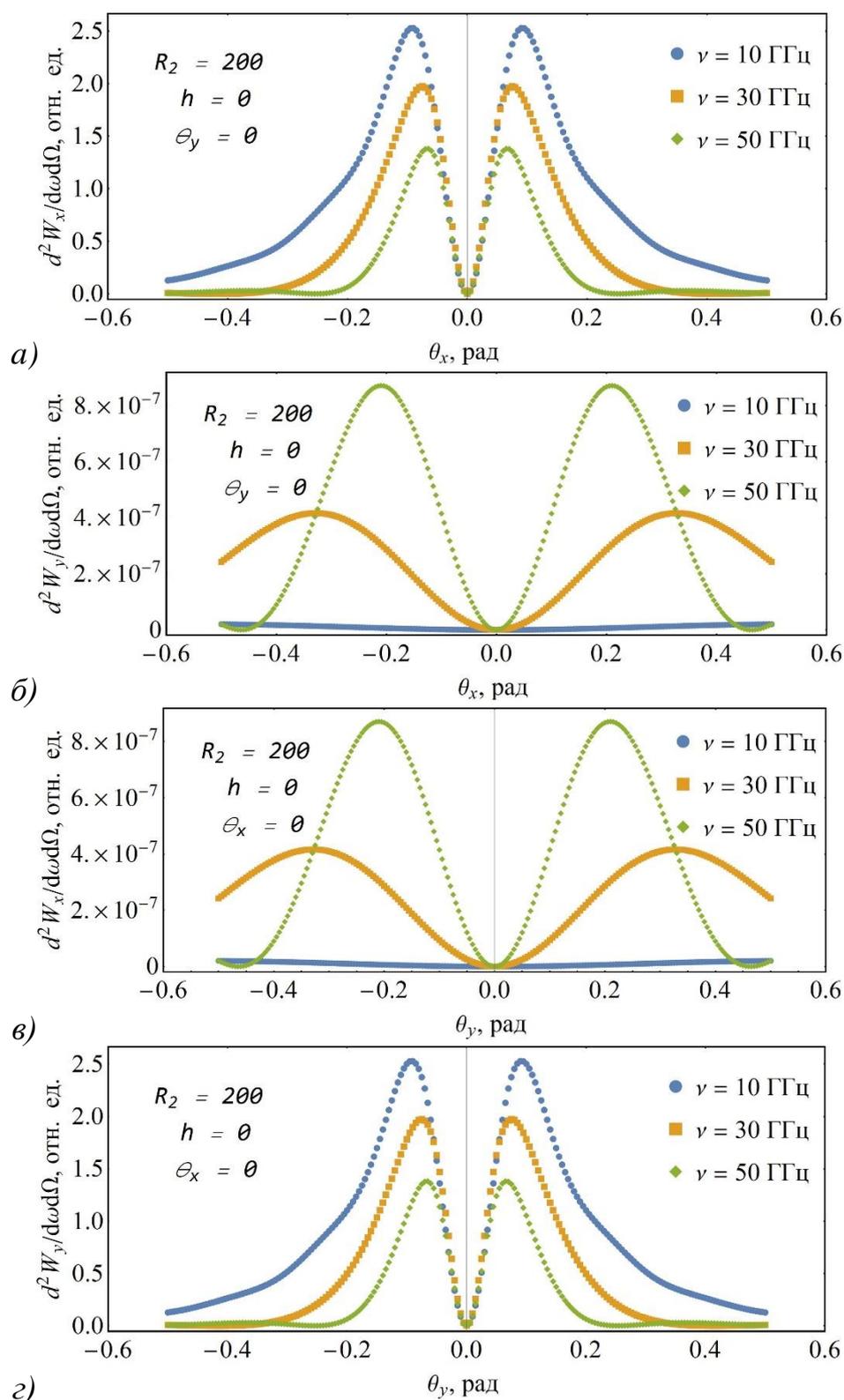


Рисунок 31 – Спектрально-угловые распределения ДИ от кольца для вертикальной и горизонтальной компоненты поля излучения вдоль оси OX и OY

Положение максимумов в пространственном распределении интенсивности ДИ от кольца и от геликоида совпадают. Схожесть угловых распределений от геликоида и кольца подтверждает адекватность результатов

моделирования первого, так как кольцо является случаем плоской мишени, возможность моделирования которых подтверждено в более ранних работах.

На рис. 32 представлены спектры от кольца и геликоидов с разным шагом разрыва. Качественно поведения спектров для всех мишеней в целом идентичны. Для $R_2 = 200$ мм и $h = 105$ мм максимум интенсивности на уровне 90% лежит в интервале $8 \div 22$ ГГц, что и требовалось, т.к. ложится в диапазон чувствительности имеющегося детектора. При уменьшении внешнего радиуса до 150 мм данный интервал смещается до $18 \div 22$ ГГц, что видно на спектре. При увеличении шага разрыва интенсивность спектра увеличилась, а само спектральное распределение сузилось. Характер спада на высоких частотах стал более резким.

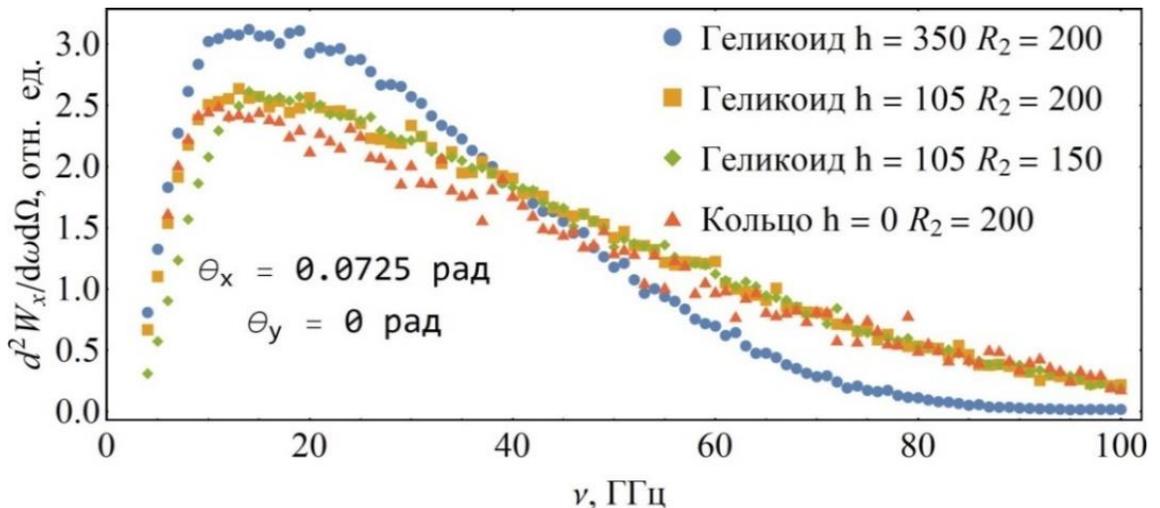


Рисунок 32 – Спектры от кольца и геликоида с разным шагом разрыва и внешним радиусом

На рис. 33 представлены зависимости в максимуме интенсивности ДИ от ширины шага разрыва для разных частот. При увеличении h интенсивность достигает максимума, а затем относительно быстро спадает. При этом для меньших частот максимум соответствует большим значениям ширины разрыва. Это все объясняет различие спектров с разным h .

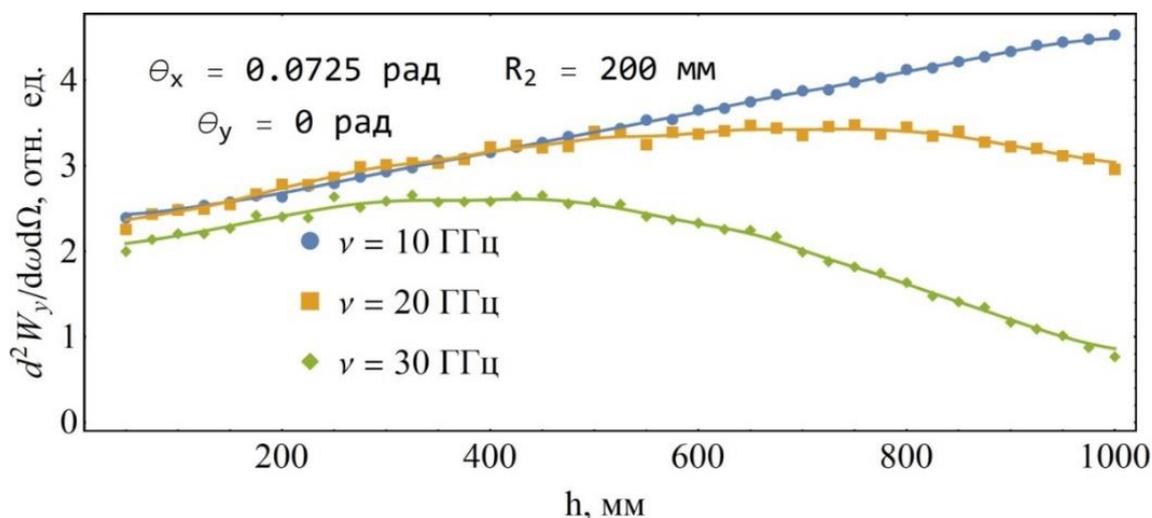
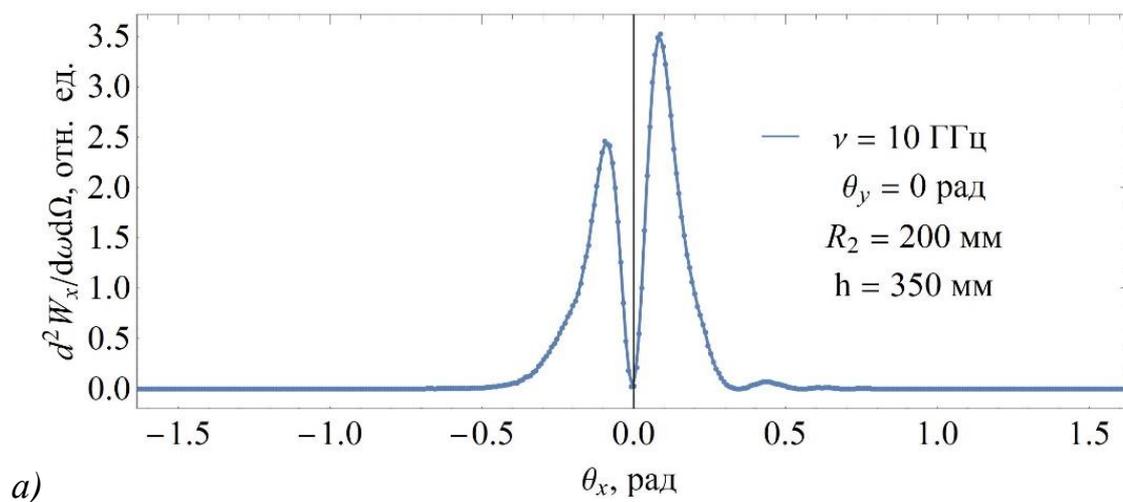
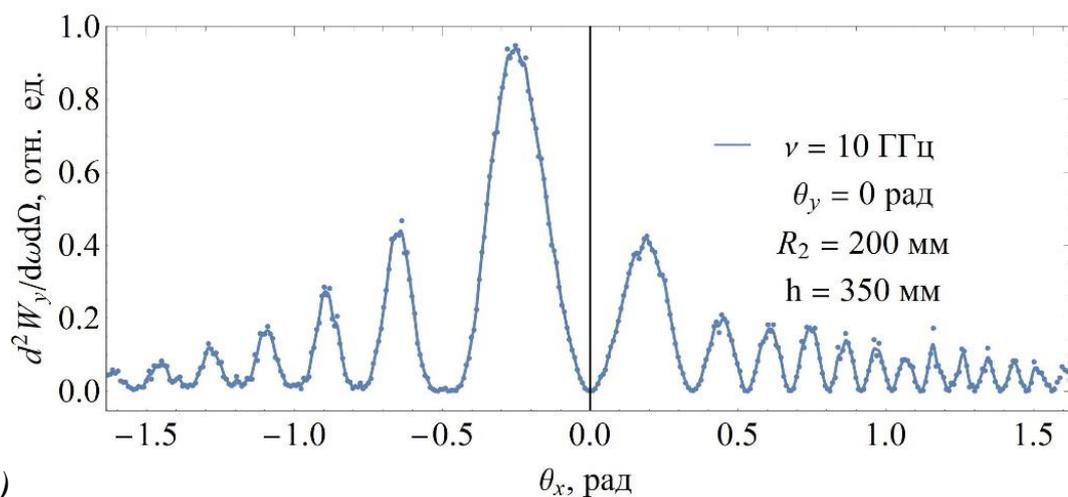


Рисунок 33 – Зависимость интенсивно ДИ от параметра h

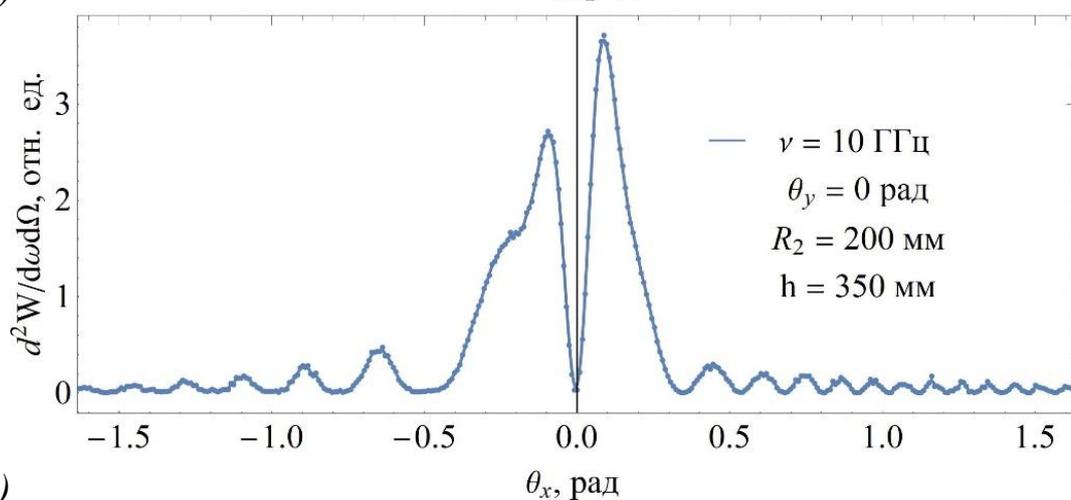
На рис. 34 представлены спектрально-угловые распределения ДИ вдоль оси ОХ от геликоида с $h = 350$ мм для суммарного поля излучения, а также его горизонтальной и вертикальной компонент поддельности. Сопоставляя данные распределения с полученными ранее с $h = 105$ мм, можно заметить, что с увеличением h растет асимметрия углового распределения, так как вертикальная и горизонтальная компоненты отличны лишь в 4 раз при $h = 350$ мм, а при шаге разрыва 105 мм компоненты отличны на порядок. То есть, с увеличением шага разрыва геликоида происходит смещение от линейной поляризации в сторону эллиптической, а возможно даже круговой. Однако это вывод требует дополнительного исследования.



a)



б)



в)

Рисунок 34 – Спектрально-угловые распределения ДИ вдоль оси ОХ от геликоида с $h = 350$ мм для горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты поля излучения и их сумма (в)

Сравнивая результаты моделирования от кольца и геликоида, можно сделать положительный вывод о применимости обобщённого метода поверхностных токов для моделирования ДИ от спиральной мишени. На основе расчёта спектрального распределения было подтверждено, что значение внешнего радиуса мишени определяет частоту, на которую приходится максимум интенсивности излучения. Было также определено, что величина шага разрыва геликоида оказывает значительное влияние на спектральное и угловое распределение ДИ, а именно на интенсивность излучения, на поляризацию излучения, на ширину спектрального распределения. Для более детальных выводов всё это требует дополнительных исследований. Можно утверждать, что подобранные радиусы мишени являются оптимальными для

проведения эксперимента на микротроне ТПУ с энергией 6.1 МэВ и длиной сгустка около 2.5 мм. Что касается шага разрыва, то необходимы дополнительные расчёты, для определения оптимального значения.

Суммируем, в результате данной работы возникли вопросы, требующие дополнительных исследований:

1. Определить причину зависимости интенсивности излучения от шага разрыва геликоида (возможная причина - приближение самой мишени к детектору при росте h);
2. Изучить поляризационные характеристики поля излучения и их зависимость от параметров мишени (в первую очередь от h);
3. Получить ограничения метода на угол падения, учитывающие углы наблюдения;
4. Рассмотреть характеристики излучения при вращении геликоида относительно своей оси.

3.2 Дифракционное излучение от фокусирующей мишени

Как уже отмечалось, дифракционное излучение применяется для диагностики заряженных частиц и для генерации излучения различных частот [2-6]. В обоих случаях важнейшей характеристикой излучения является спектрально-угловая плотность излучения, а именно количество энергии, регистрируемой детектором, которую зачастую увеличивают с помощью сложных оптических систем (в основе которых лежат линзы). Однако существует возможность увеличить спектрально-угловую плотность за счет фокусирующих свойств мишени, от которой генерируется излучение [35]. Наиболее простая в реализации фокусирующая мишень имеет форму параболоида. Параболоидные конструкции активно применяются в оптике и радиотехнике (прожектора, спутниковые тарелки). Сфокусированное излучение может быть выведено за пределы тракта ускорителя или направлено на последующие сгустки заряженных частиц, для изменения их характеристик. В

первом случае важным является сохранение фокусировки на больших расстояниях, а во втором случае максимальное увеличение интенсивности излучения за счет фокусировки. В данном разделе представлены геометрии фокусирующих мишеней, реализованные в коде, а также предварительные расчеты характеристик дифракционного излучения от созданной модели фокусирующих мишеней.

3.2.1 Общий алгоритм задания параболических мишеней

Задание мишеней в форме параболоидов производится через аналитическое уравнение данной поверхности. Уравнение кругового параболоида имеет вид [36]:

$$\frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} = z \quad (3.8)$$

где f – это фокусное расстояние, то есть расстояние от вершины параболоида до его фокуса. Данное уравнение задаёт бесконечную поверхность, поэтому необходимо ее ограничивать, например, задавая высоту h по оси OZ , тогда получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} = z \\ z \leq h \end{cases} \quad (3.9)$$

В свою очередь высоту h можно задавать через радиус окружности r , полученной при пересечении параболоида плоскостью $z = h$:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} = z \\ z = h \end{cases} \quad (3.10)$$

Тогда $x^2 + y^2 = 4fh$ и $x^2 + y^2 = r^2$. В итоге получаем значение высоты через радиус: $h = \frac{r^2}{4f}$. Тогда мишень (рис. 10) будет задаваться следующей системой:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} = z \\ z \leq \frac{r^2}{4f} \end{cases} \quad (3.11)$$

Таким образом, форма и размер параболоида будут определяться через фокусное расстояние и максимальный радиус параболоида. Дополняя основную систему дополнительными условиями можно получить разные части параболоида.

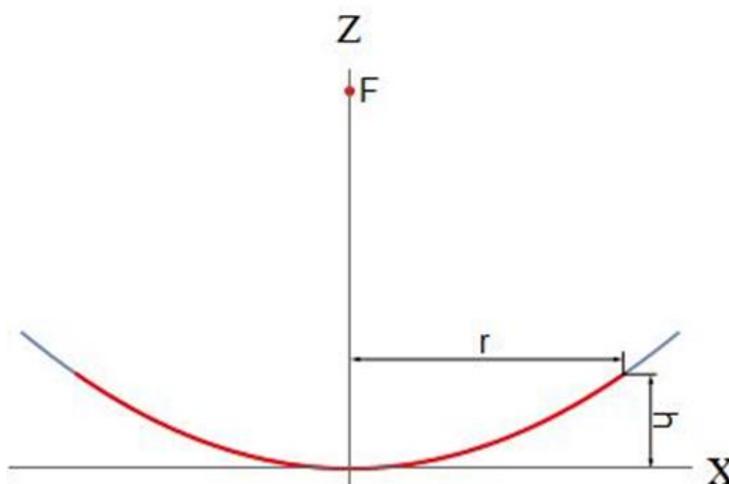


Рисунок 35 – Сечение параболоида плоскостью XOZ

3.2.2 Задание внеосевой параболической мишени

Мишени в форме параболоида или половинки параболоида не представляют интереса с точки зрения вывода излучения за пределы тракта ускорителя, так как они производят фокусировку в точке, лежащей на траектории пучка. На практике необходимо проводить фокусировку на некотором расстоянии l от траектории пучка. Этого можно добиться, если использовать внеосевые части параболоида, тогда пучок, летящий вдоль его главной оси, будет порождать дифракционное излучение, которое будет фокусироваться в бок на некотором расстоянии.

Для того чтобы фокусировка производилось непосредственно под 90 градусов от края мишени, необходимо взять начало поверхности параболоида от плоскости в $z = f$ (см. рис. 36). Для вырезки мишени (например, близкой по форме к прямоугольной) необходимо ограничить параболоид 6 плоскостями. Для этого зададим длины проекций мишени dx , dy , dz на соответствующие оси. Тогда наша мишень будет задаваться следующей системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} = z \\ -f - dz \leq z \leq -f \\ -\frac{dy}{2} \leq y \leq \frac{dy}{2} \\ -2f - dx \leq x \leq -2f \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Ограничивая какие-либо 2 координаты, мы автоматически ограничиваем и 3 координату. Поэтому, для удобства, оставим ограничения для z и y . Однако надо учесть, что на одно значение по z приходится два значения x , поэтому система будет иметь вид (рис. 36):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} = z \\ -f - dz \leq z \leq -f \\ -\frac{dy}{2} \leq y \leq \frac{dy}{2} \\ x \leq 0 \end{array} \right. \quad (3.13)$$

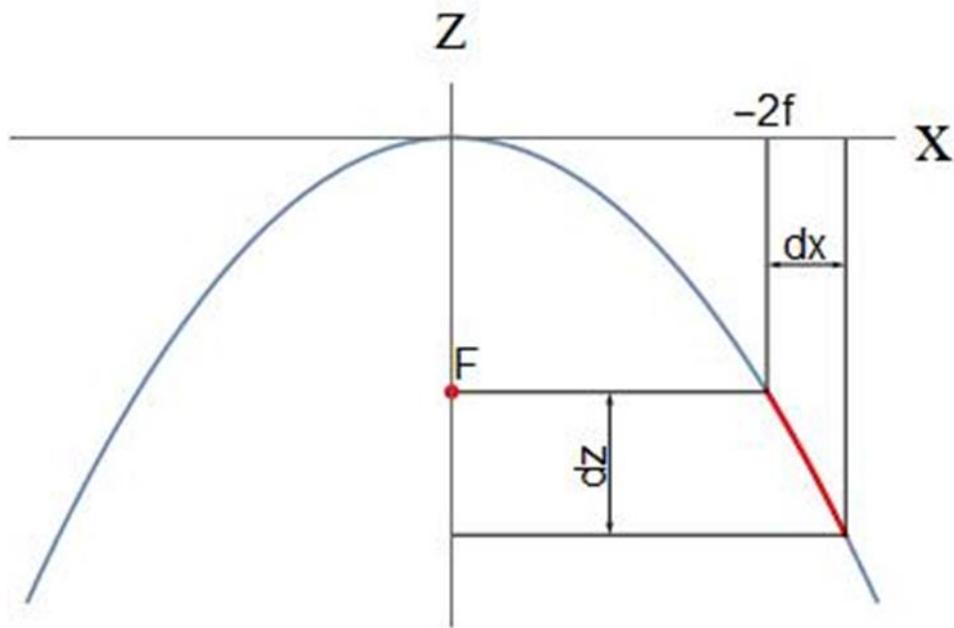


Рисунок 36 – Ограничения части параболоида в сечении XOZ

Так как в нашей модели пучок движется по оси OZ в положительную сторону, и прицельный параметр h отсчитывается от края мишени, необходимо сместить полученную мишень на вектор $\{2f - h, 0, f\}$, чтобы край мишени

располагалась на расстоянии h от траектории пучка. Тогда расстояние от оси OZ до точки фокусировки l , будет равна $2f - h$ (рис. 37).

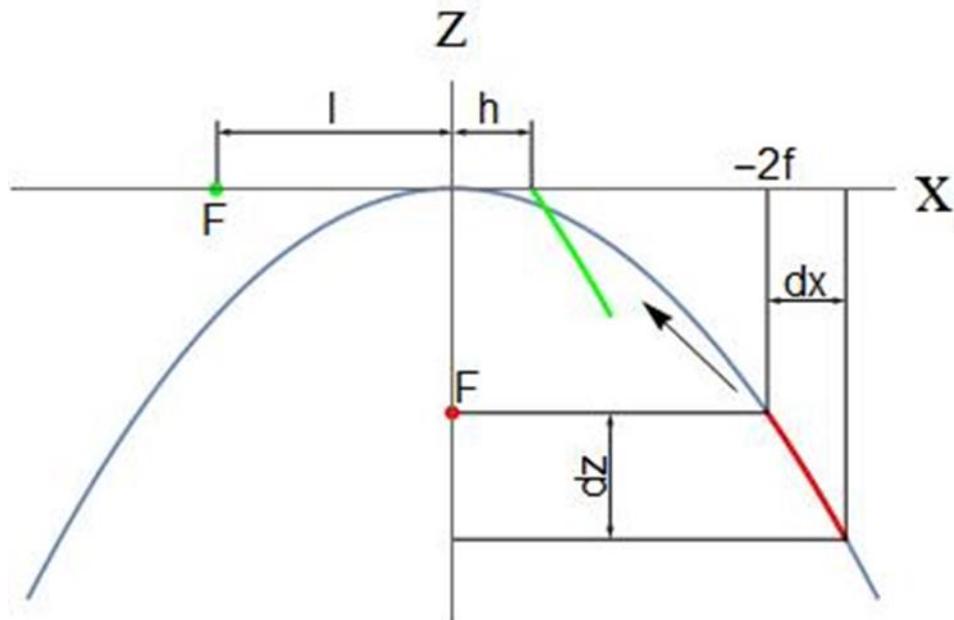


Рисунок 37 – Окончательная внеосевая мишень (зеленая) в сечении

3.2.3 Задание вектора нормали к поверхности мишени

По правилам аналитической геометрии [36], вектор нормали в точке на внешней поверхности равен значению градиента функции в данной точке:

$$\vec{n}(r) = \overrightarrow{\text{grad}} F(r) \quad (3.14)$$

где $F(r)$ – неявно выраженная функция. У параболоида $F(r) = \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} - z$, тогда вектор нормали для него будет определяться следующим образом:

$$\vec{n}(x, y, z) = \left\{ -\frac{x}{2f}, -\frac{y}{2f}, 1 \right\} \quad (3.15)$$

Смена знаков в координатах вектора нормали обусловлена выбором внутренней, а не внешней поверхности параболоида.

3.2.4 Результаты моделирования дифракционного излучения от фокусирующей мишени и их обсуждение

Для моделирования использовалась внеосевая мишень с различными значениями фокусного расстояния. На рис. 38 представлена общая схема

моделирования. Детектор располагается в точке фокусировки, которая располагается на оси OX на двойном фокусном расстоянии от начала координат (см. рис. 38).

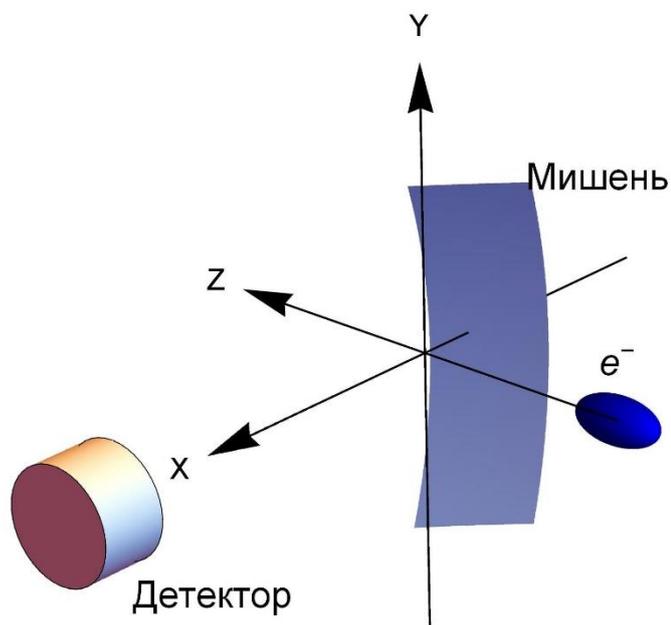


Рисунок 38 – Схема моделирования от внеосевой фокусирующей мишени

Габариты фокусирующей мишени были ограничены 10 мм по оси OZ и 30 мм по оси OY . Это максимальные габариты, так как размеры по оси OY также зависят от фокусного расстояния мишени. Для сравнения с плоской мишенью бралась плоская мишень, у которой проекция стороны на ось OZ также была равна 10 мм, а размер вдоль оси ординат был таковым, чтобы площади сравниваемых мишеней были равными. При фокусных расстояниях больших 10 мм габариты мишени фактически не изменяются, также визуально слабо изменяется кривизна мишени, а вместе с ней незначительно площади мишени. С увеличением фокусного расстояния уменьшается кривизна поверхности мишени при сохранении габаритов мишени (см. рис. 39). При больших фокусных расстояниях и малых размерах фокусирующая мишень внешне практически полностью идентична плоской мишени.

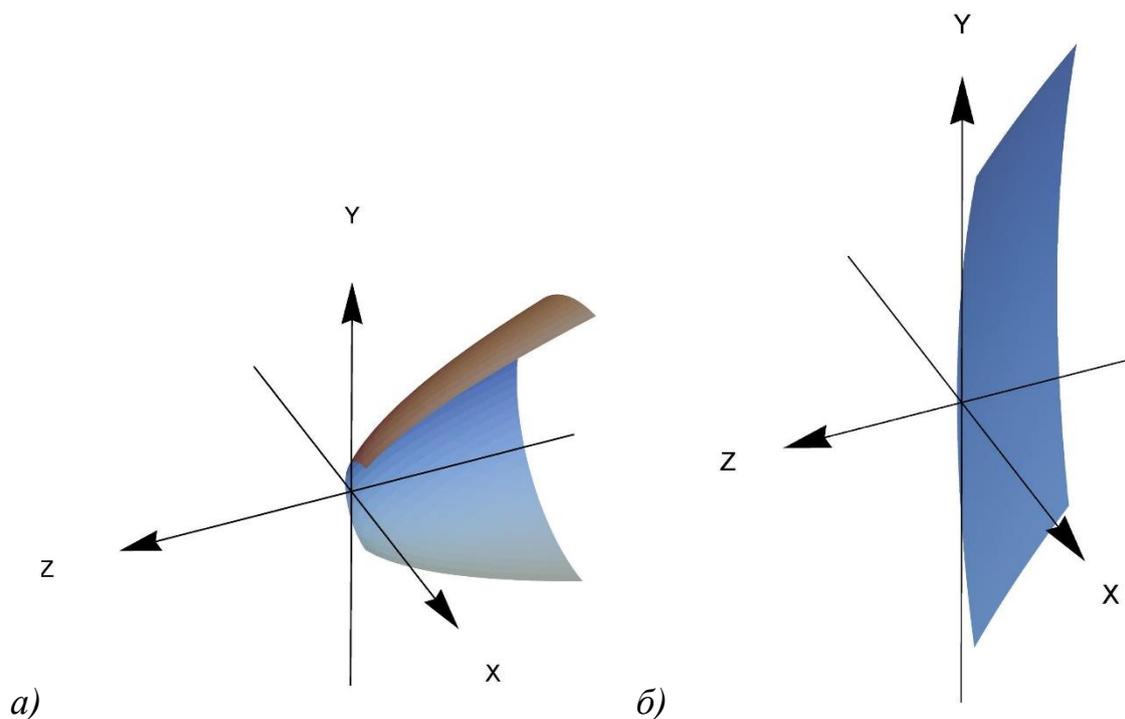


Рисунок 39 – Фокусирующие мишени с разными фокусными расстояниями: 1 мм (а) и 25 мм (б)

Энергия электронов и прицельный параметр были взяты такими, чтобы генерируемое некогерентное излучение соответствовало терагерцовому диапазону. Энергия электронов была задана равной 10 МэВ. Прицельный параметр был равен 0.6 мм. На рис. 40 представлены спектрально-угловые распределения, рассчитанные при частоте 400 ГГц. Фокусное расстояние было взято равной 0.8 мм, так чтобы фокусировка производилась вблизи начала координат. Тем самым проверить, какова эффективность фокусировки, при направлении излучения на последующие сгустки. Как видно из полученных результатов, излучение в такой близости от мишени является изотропным. Интенсивность излучения от фокусирующей мишени фактически в 35 раз больше, чем от плоской мишени.

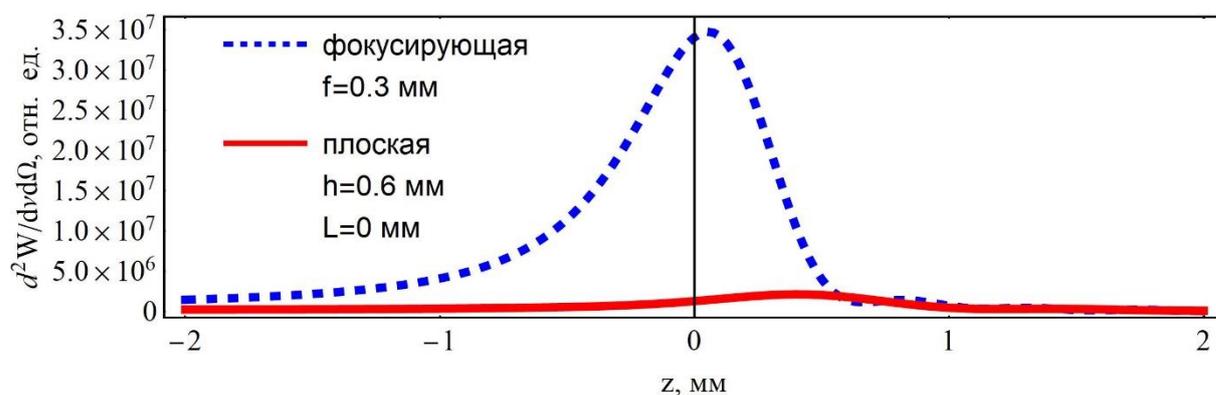


Рисунок 40 – Спектрально-угловое распределение от плоской и фокусирующей мишени вблизи начала координат

Для изучения фокусирующих свойств мишени с увеличением фокусного расстояния и с сохранением габаритов мишени был произведен расчет спектрально-угловых распределений от фокусирующей мишени с различными фокусными расстояниями. Результаты от фокусирующей мишени были сопоставлены с результатами от плоской мишени и представлены на рис. 41. В таблице 2 представлены значения кратности фокусировки, равные отношению интенсивности излучения от фокусирующей мишени в точке фокусировки к максимуму интенсивности в угловом распределении от плоской мишени.

Таблица 2. Значения коэффициента фокусировки

Фокусное расстояние f , мм	Кратность фокусировки, k_f
1.3	19.9
5.3	5.2
25.3	1.7
50.3	1.3
100.3	1.2
250.3	1.1

Из таблицы 2 видно, что с увеличением фокусного расстояния происходит уменьшение кратности фокусировки, что обусловлено тем, что с увеличением фокусного расстояния и с сохранением габаритов мишени происходит уменьшение кривизны поверхности, поэтому угловые распределения от плоской и фокусирующей мишени с увеличением f становятся мало отличимыми (см. рис. 41).

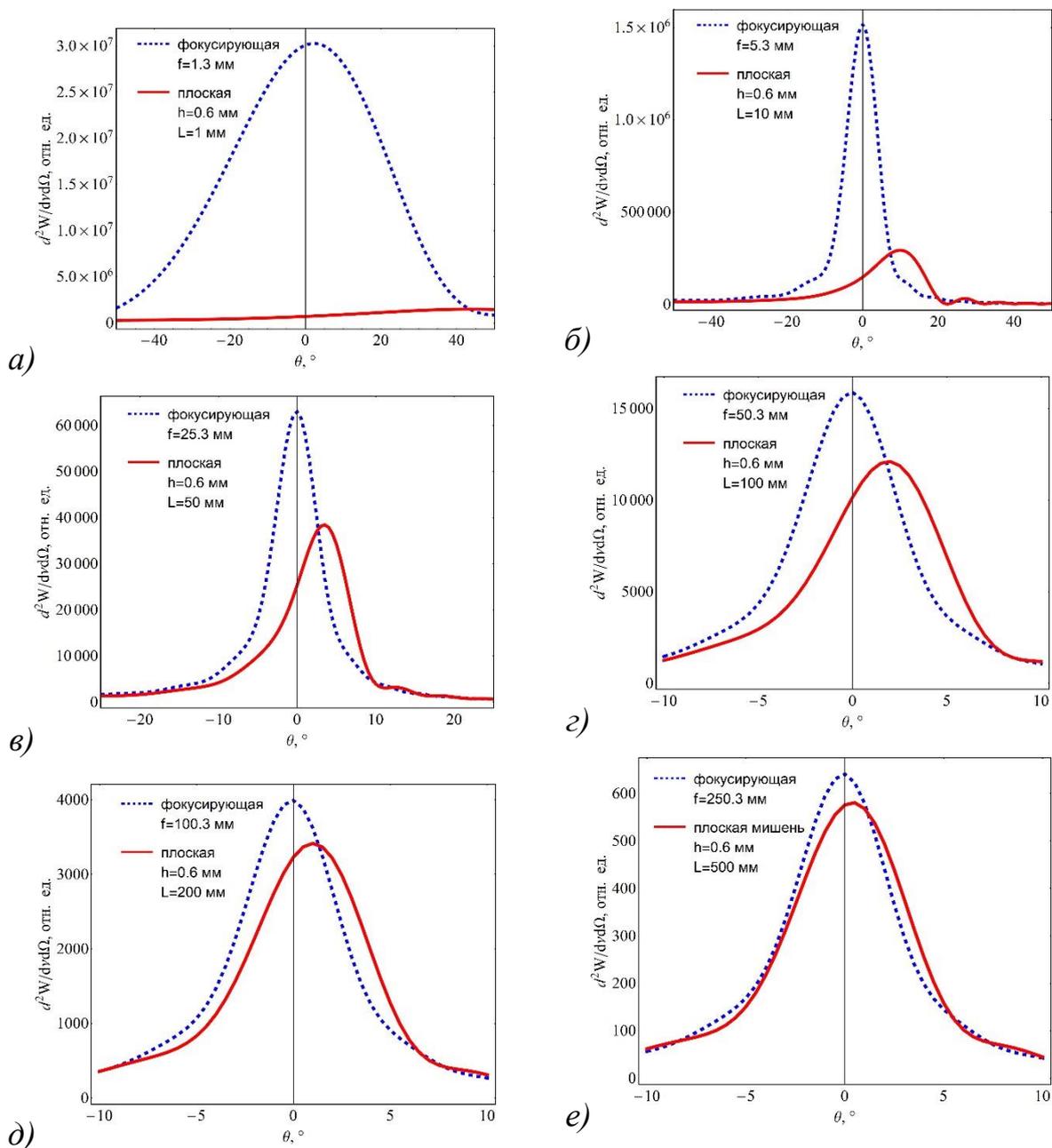


Рисунок 41 – Спектрально-угловое распределение от плоской и фокусирующей мишени с различным фокусным расстоянием: 1.3 мм (а) 5.3 мм (б), 25.3 мм (в), 50.3 мм (г), 100.3 мм (д) и 250.3 мм (е)

Также стоит отметить, что фокусировка не влияет на мононаправленность излучения (не происходит уширения или сужения углового распределения), однако изменяет положение максимума излучения, сводя его в точку фокусировки.

Из провиденного анализа результатов моделирования можно заключить, что фокусирующая мишень имеет потенциал применения. Во-первых, для фокусировки сгенерированного излучения на последующие сгустки. Кратность

усиления излучения в этих случаях достигает нескольких десятков. Во-вторых, фокусирующую мишень возможно использовать для вывода излучения из канала тракта ускорителя, однако в этом существует ряд ограничений. С увеличением фокусного расстояния мишени происходит уменьшение кривизны поверхности, что значительно уменьшает эффект фокусировки с единичной площади поверхности. Другими словами, чтобы добиться значительного усиления интенсивности от фокусировки на большом расстоянии, необходимо увеличивать габариты мишени, что нежелательно в большинстве случаев. Для решения данного вопроса необходимо привести дополнительные исследования для выявления конкретной зависимости между размерами мишени, её фокусным расстоянием и фокусирующими свойствами. Также необходимо изучить возможность применения фокусирующей мишени в связке с существующими оптическими системами, направленными на фокусировку сгенерированного излучения.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности, конкурентоспособности и соответствия разработок, предлагаемых в рамках научного исследования, современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработок.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

исследования.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Основой анализа конкурентного технического решения будет выбор технического исполнения задачи. Собственным вариантом технического исполнения является программа численного моделирования, написанная на языке программирования Wolfram Language. Созданная программа специализируется на расчетах поляризационных видов излучения (в частности дифракционное) от мишеней, геометрию которых можно задавать. Конкурентами являются менее специализированные программы: CST Studio Suite и VSim. Данные программные комплексы используются для моделирования фактически любых электромагнитных процессов, к которым в частности относятся поляризационные виды излучения. В оценочной карте сравнены сильные и слабые стороны конкурирующих технических решений.

Сравнительный анализ осуществляется по наиболее важным показателям (с точки зрения моделирования поляризационного излучения) с помощью экспертной оценки по пятибалльной шкале, где 1 – наихудшая оценка,

а 5 – наилучшая оценка соответствия технического решения показателю. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Соб. код	CST	VSim	Соб. код	CST	VSim
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Соответствие результатов моделирования результатам реального эксперимента	0,14	5	5	4	0.7	0,7	0.56
Скорость расчета	0,13	5	3	2	0.65	0.39	0.26
Легкость реализации различных мишеней	0,12	5	3	4	0.6	0.36	0.48
Инструментальные возможности обработки результатов	0,11	5	4	3	0.55	0.44	0.33
Визуализация	0.1	5	5	5	0.5	0.5	0.5
Требования к техническим навыкам	0,09	4	2	3	0.36	0.18	0.27
Специализированность программы	0.08	5	2	2	0.4	0.16	0.16
Экономические критерии оценки эффективности							
Необходимые производственные ресурсы	0,14	5	3	4	0.7	0.42	0.56
Финансовая доступность для пользователя	0,09	5	2	3	0.45	0.18	0.27
Итого	1	49	29	30	4.91	3.33	3,39

Результаты анализа, представленные в таблице 3, позволяют заключить, что конкурентоспособность в рамках моделировании поляризаационных излучений выше у собственного кода, чем у коммерческих аналогов. Это объяснимо тем, что CST Studio Suite и VSim являются универсальными, крупными программными комплексами, которые требуют значительных производительных ресурсов вычислительной техники, а также более квалифицированных пользователей, чем для созданной специализированной программы.

4.1.2 SWOT-анализ

В таблице 4 приведена итоговая SWOT-матрица, содержащая в себе оценку сильных и слабых сторон технического исполнения задания, а также их связь с возможностями и угрозами.

Таблица 4 – SWOT-анализ

	Strengths (сильные стороны)	Weaknesses (слабые стороны)
	<p>S1. Позволяет произвести расчет излучения практически от любой мишени;</p> <p>S2. Низкие требования к производительности компьютера;</p> <p>S3. Большой потенциал развития кода;</p> <p>S4. Интуитивно понятный интерфейс программы, позволяет обходиться без навыков программирования;</p> <p>S5. Возможность динамически изменять параметры моделирования в режиме реального времени;</p> <p>S6. Относительно высокая скорость расчетов;</p> <p>S7. Большой инструментарий обработки результатов моделирования.</p>	<p>W1. Ограничения кода, накладываемые физической моделью;</p> <p>W2. Ограничения в скорости расчетов, накладываемые используемыми численными методами интегрирования, реализованных Wolfram Mathematica.</p>
<p>Opportunities (возможности)</p> <p>O1. Проведение моделирования перед постановкой эксперимента;</p> <p>O2. Диагностика размеров сгустков по реальным спектрам;</p> <p>O3. Создание новых моделей мишеней;</p> <p>O4. Использование программы в обучающих целях;</p> <p>O5. Расширение используемой физической модели;</p> <p>O6. Возможность подключения библиотек других языков программирования.</p>	<p>O1O2S1S4S5S6S7 – провести оценку качества работы программы на реальном эксперименте и выложить программу в общественный доступ;</p> <p>O3S1S5S6S7 – смоделировать спектры излучения с желаемыми характеристиками и представить параметры мишеней для создания реальных моделей;</p> <p>O4S1S2S4S5S6S7 – использовать программу в качестве наглядной демонстрации взаимодействия ионизирующих излучений с веществом в соответствующих курсах, для лучшего понимания студентами физики процесса и симуляции эксперимента в отсутствие или дорогостоящей эксплуатации реальных установок.</p>	<p>O3O5W1 – расширение возможностей кода за счет обобщения используемой физической модели;</p> <p>O6W2 – использования алгоритмов численного моделирования из других библиотек языков программирования.</p>
<p>Threats (угрозы)</p> <p>T1. На имеющихся установках существуют отлаженные системы расчета значений;</p>	<p>T1S1S3S4S6S7 – простота интерфейса, визуализация эксперимента и высокая скорость расчетов и гибкость кода - решающие факторы в популяризации программы среди исследовательских институтов, более того нововведенные параметры сгустков учтенные в программе являются новаторскими и увеличивают предсказательную способность модели.</p>	<p>T1W1 – дополнить программу различными геометриями мишеней или обобщить метод моделирования;</p> <p>T1W2 – проведение дальнейшей оптимизации кода для получения максимальной производительности расчетов</p>

Таблица 5 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
O1	+	-	-	+	+	+	+
O2	+	-	-	+	+	+	+
O3	+	-	-	-	+	+	+
O4	+	+	-	+	+	+	+
O5	-	-	-	-	-	-	-
O6	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 6 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2
O1	-	-
O2	-	-
O3	+	-
O4	-	-
O5	+	-
O6	-	+

Таблица 7 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
T1	+	-	-	+	-	+	+

Таблица 8 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2
T1	+	+

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного научного исследования необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и инженер. Исходя из вида запланированных работ устанавливается должность исполнителя этой работы. Разработанный список задач и производимых работ в рамках исследования, а также распределение исполнителей по видам исполняемых работ представлен в виде таблицы 9.

Таблица 9 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель
			Инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по проведению исследования	Руководитель
Теоретические исследования и создание программ для моделирования	5	Формирования теоретической базы	Инженер
	6	Создание программного кода	Инженер
	7	Оптимизация программного кода	Инженер
	8	Верификация программного кода	Руководитель
Инженер			
Излучение свойств дифракционного излучения от различных мишеней	9	Созданные мишеней различной формы и конфигурации	Инженер
	10	Моделирование спектрально-угловых распределений дифракционного излучения от созданных моделей мишеней	Инженер
	11	Анализ и обсуждение результатов моделирования	Руководитель
Инженер			
Контроль и координирование НИР	12	Контроль качества выполнения работ и консультирование исполнителя	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	13	Составление пояснительной записки к программному коду	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

Основная часть стоимости проведения исследования составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников исследования.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ож i}$ определяется по формуле:

$$t_{ож i} = \frac{3t_{min i} + 2t_{max i}}{5} \quad (4.1)$$

где $t_{min i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой в предположении удачного стечения обстоятельств), чел.-дн.; $t_{max i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой в предположении неудачного стечения обстоятельств), чел.-дн. На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} :

$$T_{pi} = \frac{t_{ож i}}{Ч_i} \quad (4.2)$$

где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 10. Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ. Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи. Построенная диаграмма представлена на рис. 42

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$\begin{aligned} T_{ки.рук} &= T_{pi} \cdot k_{кал} \\ T_{ки.инж} &= T_{pi} \cdot k_{кал} \end{aligned} \quad (4.3)$$

где $k_{\text{кал}}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$\begin{aligned}k_{\text{кал.рук}} &= \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \\k_{\text{кал.инж}} &= \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}\end{aligned}\tag{4.4}$$

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

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$\begin{aligned}t_{\text{ож}i} &= \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2.8 \text{ чел.-дн.}, \\T_{\text{pi}} &= \frac{t_{\text{ож}i}}{ч_i} = \frac{2.8}{1} = 2.8 \text{ раб. дн.},\end{aligned}$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 66 - 14} = 1.28.$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы инженером на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{\text{ки.инж}} = T_{\text{pi}} \cdot k_{\text{кал}} = 1.9 \cdot 1.28 = 2,432 \approx 2 \text{ кал.дн.}$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1.48$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{\text{ки.инж}} = T_{\text{pi}} \cdot k_{\text{кал}} = 1.6 \cdot 1.48 = 2.368 \approx 2 \text{ кал.дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 11.

Таблица 10 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	2	-	4	-	2.8	-	2.8	-	4	-
Выбор направления исследований	2	3	5	5	3.2	3.8	1.6	1.9	2	2
Подбор и изучение материалов по теме	-	8	-	12	-	9.6	-	9.6	-	12
Календарное планирование работ по проведению исследования	1	-	3	-	1.8	-	1.8	-	3	-
Формирования теоретической базы	-	7	-	14	-	9.8	-	9.8	-	13
Создание программного кода	-	7	-	14	-	9.8	-	9.8	-	13
Оптимизация программного кода	-	7	-	14	-	9.8	-	9.8	-	13
Верификация программного кода	4	4	8	8	5.6	5.6	2.8	2.8	4	4
Созданные мишеней различной формы и конфигурации	-	21	-	28	-	23.8	-	23.8	-	30
Моделирование спектрально-угловых распределений	-	10	-	15	-	12	-	12	-	15
Анализ и обсуждение результатов моделирования	4	20	6	30	4.8	24	2.4	12	4	15
Контроль качества выполнения работ и консультирование исполнителя	4	-	6	-	4.8	-	4.8	-	7	-
Составление пояснительной записки к программному коду	-	3	-	7	-	4.6	-	4.6	-	6
Итого	17	90	32	147	23	112.8	16.2	96.1	24	123

Таблица 11. Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	138
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	123
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	24

№	Название работы	Исп.	T _{кп} , кал. дн	Продолжительность выполнения работ															
				Янв.		Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Исп.1	4		▨														
2	Выбор направления исследований	Исп.1 Исп.2	2		▨														
3	Подбор и изучение материалов по теме	Исп.2	12			■													
4	Календарное планирование работ по проведению исследования	Исп.1	3				▨												
5	Формирования теоретической базы	Исп.2	13				■												
6	Создание программного кода	Исп.2	13					■											
7	Оптимизация программного кода	Исп.2	13						■										
8	Верификация программного кода	Исп.1 Исп.2	4 4																
9	Созданные мишеней различной формы и конфигурации	Исп.2	30																
10	Моделирование спектрально-угловых распределений	Исп.2	15																
11	Анализ и обсуждение результатов моделирования	Исп.1 Исп.2	4 15																
12	Контроль качества выполнения работ и консультирование исполнителя	Исп.1	7																
13	Составление пояснительной записки к программному коду	Исп.2	6																



Исп.1 (руководитель)



Исп.2 (инженер)

Рисунок 42 – Диаграмма Ганта

4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям.

4.3.1 Материальные затраты на НИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (15 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 12.

Таблица 12 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб.	Затраты, руб.
Бумага офисная А4	уп.	2	350	806
Канцелярские товары	уп.	1	200	230
Итого, руб.			1036	

4.3.2. Расчет амортизации специального оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость исследовательской работы входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Таблица 13 – Затраты на оборудование

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
Acer Nitro 5 AN515-52-76VJ	1	5	78.5	78.5
Итого:	78500 руб.			

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{365} \cdot d \quad (4.6)$$

где $И$ – итоговая сумма, тыс. руб.; d – время использования, дн.

Рассчитаем амортизацию для ноутбука Acer Nitro 5 AN515-52-76VJ, с учётом, что срок полезного использования 5 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0.2.$$

$$A = \frac{H_A \cdot И}{365} \cdot d = \frac{0.2 \cdot 78500}{365} \cdot 138 = 5936 \text{ руб.},$$

Полученное значение занесено в Таблицу 14.

Таблица 14 – Суммарные затраты амортизационных отчислений

Наименование оборудования	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Срок полезного использования, лет	Срок пользования в рамках проекта, дн.	Амортизационные отчисления, руб.
Acer Nitro 5 AN515-52-76VJ	78.5	5	138	5936
Итого:	5936 руб.			

4.3.3. Основная заработная плата

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью исследовательской работы и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (4.7)$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 4.8).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{39000 \cdot 11.2}{214} = 2041.1 \text{ руб.},$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 4.13); M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11.2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10.3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{30420 \cdot 10.3}{217} = 1443.9 \text{ руб.},$$

Должностной оклад работника за месяц для руководителя:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 20000 \cdot (1 + 0.3 + 0.2) \cdot 1.3 = 39000 \text{ руб.},$$

Должностной оклад работника за месяц для инженера:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 15600 \cdot (1 + 0.3 + 0.2) \cdot 1.3 = 30420 \text{ руб.},$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равен 0.3; k_d – коэффициент доплат и надбавок, равен 0.2; k_p – районный коэффициент, равен 1.3 (для г. Томска).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	104/14	66/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	28/5	56/12
Действительный годовой фонд рабочего времени	214	217

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{тс}$, руб	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$, руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	20000	0,3	0,2	1,3	39000	2041,1	16	32657.6
Инженер	15600	0,3	0,2	1,3	30420	1443,9	96	138614.4
Итого:								171272

4.3.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0.15 \cdot 32657.6 = 4898.6 \text{ руб.},$$

Для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0.15 \cdot 138614.4 = 20792.2 \text{ руб.},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0.3 \cdot (32657.6 + 4898.6) = 11266.9 \text{ руб.},$$

Для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0.3 \cdot (138614.4 + 20792.2) = 47822 \text{ руб.},$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.3.6. Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \dots 5) \cdot k_{\text{нр}} = \\ = (5936 + 1036 + 171272 + 25690.8 + 59088.9) \cdot 0.2 = \text{руб.},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 17.

Таблица 17 – Группировка затрат по статьям

Амортизация, руб.	Сырье, материалы, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Итого без накладных расходов, руб.	Накладные расходы, руб.	Итого бюджетная стоимость, руб.
5936	1036	171272	25690.8	59088.9	268023.64	42083.78	310107.42

4.4. Определение ресурсоэффективности исследования

4.4.1. Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель

реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения 2, 3 были выбраны ближайшие аналоги среды программирования:

1. Реализация исполнения программного кода в среде *Wolfram Mathematica*. Этот вариант исполнения работы был выбран в качестве основного. *Wolfram Mathematica* – система компьютерной алгебры, включающая множество функций для аналитических преобразований и численных расчетов. Система включает средства визуализации, поддерживает работу со звуком. Пользовательский интерфейс удобен и понятен. *Mathematica* обладает возможностью осуществлять вызовы функций и принимать вызовы с C, .NET, Java и других языков, генерировать C код, компилировать автономные библиотеки и исполняемые файлы. Сама система бесплатна для сотрудников и студентов ТПУ, поэтому итоговые затраты на научное исследование составили 310107.42 руб.

2. Реализация исполнения программного кода с применением рабочей среды MATLAB. MATLAB – пакет прикладных программ для решения разнообразных задач технических вычислений. В рамках пакета введен одноименный язык программирования. В пакет входят инструменты для решения задач цифровой обработки сигналов, финансового анализа, разнообразных математических задач, визуализации и представления данных, расчета систем управления, и т.п. Также есть возможность интеграции с рядом дополнительных инструментальных средств – тулбоксов, типа Simulink. Однако этот вариант больше подходит для работ с большими объемами данных, и может быть применим в случае, когда ведется учет излучения от каждого электрона в сгустке. В то же время, годовая лицензия Matlab home стоит 10000 рублей, что увеличивает затраты на научное исследование до 320107.42руб.

3. Реализация исполнения программного кода в среде Maple. Maple – является важным инструментом для исследователей, преподавателей и студентов в любых математических и технических дисциплинах. Общая ориентированность пакета

на символьные преобразования (компьютерную алгебру), но также поддерживает и численные вычисления. Кроме того, имеется несколько тысяч специальных функций, хранящихся в подгружаемых к ядру пакетах и библиотеках. Обладает графическими возможностями, средствами программирования. С учетом стоимости лицензии (9000 руб.), затраты на научное исследование составят 319107.42 руб.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} ; \quad (4.8)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского работы (в т.ч. аналогов).

Рассчитаем значения интегрального финансового показателя для различных вариантов исполнения:

$$\text{Вариант 1:} \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{310107.42}{320107.42} = 0.969;$$

$$\text{Вариант 2:} \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{320107.42}{320107.42} = 1;$$

$$\text{Вариант 3:} \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{319107.42}{320107.42} = 0.997;$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) с меньшим перевесом признан более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

4.4.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности исследовательской работы, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.9)$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент для характеристики; b_i – бальная оценка варианта исполнения, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик исполнения исследования, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 18.

Расчет интегрального показателя для используемого варианта исполнения исследования:

$$I_{p1} = 0.1 * 2 + 0.2 * 3 + 0.3 * 5 + 0.2 * 5 + 0.1 * 5 + 0.1 * 2 = 4 ;$$

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения исследования для исполнителя

Критерии	Весовой коэффициент	Вариант 1 (Текущий проект)	Вариант 2	Вариант 3
1. Контроль качества кода	0.1	2	5	5
2. Простота использования	0.2	5	4	5
3. Быстрота внедрения обновлений в программу	0.3	5	4	4
4. Потребление ресурсов компьютера	0.2	5	3	3
5. Доступность для рядового пользователя	0.1	5	2	2
6. Система контроля версий	0.1	2	5	5
Итого:	1	4	3.8	4

Расчет интегрального показателя для альтернативных вариантов исполнения:

$$I_{p2} = 0.1 * 5 + 0.2 * 4 + 0.3 * 4 + 0.2 * 3 + 0.1 * 2 + 0.1 * 5 = 3.8 ;$$

$$I_{p3} = 0.1 * 5 + 0.2 * 4 + 0.3 * 4 + 0.2 * 3 + 0.1 * 2 + 0.1 * 5 = 4 .$$

4.4.3. Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Интегральный показатель эффективности определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p1}}{I_{финр}^{исп.1}} = \frac{4}{0.969} = 4.1 ;$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность исполнения исследовательской работы и выбрать наиболее целесообразный

вариант из предложенных (таблица 19). К примеру, для исполнения 2 сравнительная эффективность ($E_{ср,2}$):

$$E_{ср,2} = \frac{I_{исп2}}{I_{исп1}} = \frac{3.8}{4.1} = 0.927 ;$$

Таблица 19 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0.969	1	0.997
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4	3.8	4
3	Интегральный показатель эффективности	4.1	3.8	4.01
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0.927	0.978

4.5. Выводы по разделу

Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации исследования как наиболее предпочтительного и рационального по сравнению с остальными;

При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 138 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 123 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 24;

Составлен бюджет научного исследования, позволяющий оценить затраты на его реализацию, которые составляют 310107,42 руб;

По факту оценки эффективности НИ, можно сделать следующие выводы:

- Значение интегрального финансового показателя НИ составляет 0.969, что является показателем того, что НИ является финансово выгодным по сравнению с аналогами;
- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности НИ составляет 4, по сравнению с 3.8 и 4 для других вариантов;

- Значение интегрального показателя эффективности НИ составляет 4.1, по сравнению с 3.8 и 4.0, и является наиболее высоким, что означает, что было выбрано наиболее эффективный вариант исполнения научно-исследовательской работы.

5. Социальная ответственность

Предметом изучения выполненной квалификационной работы было дифракционное излучение от металлических мишеней различной формы и конфигурации. Генерация излучения происходит при пролете электронного пучка вблизи поверхности мишени. Пучки заряженных частиц формируются с помощью электронного ускорителя. Основным ускорителем, на котором базируется исследование в данной работе, является исследовательский микротрон ТПУ с энергией 6.1 МэВ.

Механизм дифракционного излучения имеет два основных применения: генерация электромагнитного излучения и диагностика электронных пучков. Генерируемое излучение от мишени можно применять в различных сферах в зависимости от его свойств. Например, терагерцовое излучение, генерируемое от мишени в форме решётки, можно применять в частности в медицине (томография) и в сфере безопасности.

В данном разделе будут рассмотрены опасные и вредные факторы при компьютерном моделировании дифракционного излучения и при непосредственной генерации его в эксперименте. Также будут решены вопросы обеспечения защиты от них на основе требований действующих нормативных документов.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В соответствии с пунктом 13.1 статьи 13 Постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.2003 № 118". О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03" лица, работающие с персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) более 50% рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке.

Согласно 91 статье Трудового кодекса Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ [37] нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. Работодатель обязан вести учет времени, фактически отработанного каждым работником.

В соответствии с СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ» [38] к работе на ускорителе допускаются лица:

- не моложе 18 лет;
- не имеющие медицинских противопоказаний;
- отнесенные приказом руководителя организации к категории персонала группы А;
- прошедшие обучение по правилам работы на ускорителе и по радиационной безопасности;
- прошедшие инструктаж по радиационной безопасности.

Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям, указанным в ГОСТе 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [39]. По ГОСТ 23000-78 «Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования» [40] пульта управления для работы в положении сидя должны иметь пространство для ног оператора с размерами не менее:

- 600 мм – по высоте;
- 400 мм – по глубине (на уровне колен);
- 600 мм – по глубине (на уровне пола);
- 500 мм – по ширине.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [41] высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм; при отсутствии такой

возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм. Рабочий стол должен иметь 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. Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углом наклона вперед до 15° и назад до 5°;
- высоту опорной поверхности спинки 300 ± 20 мм, ширину – не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости – 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260-400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной – 50-70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 ± 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350-500 мм.

Рабочее место пользователя ПЭВМ следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм [41].

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы [41].

5.2 Производственная безопасность

Выбор факторов осуществлялся с использованием ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [42].

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой работы представлены в таблице 20.

Таблица 20 - Возможные вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работы		Нормативные документы
	Моделирование	Эксперимент	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические Требования к микроклимату производственных помещений»
2. Превышение уровня шума	+	+	СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»
4. Повышенный уровень электромагнитных излучений	+	+	СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»
5. Повышенный уровень ионизирующих излучений		+	СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009»
6. Психофизиологические факторы	+		СанПиН 2.2.2/2.4.2732-10 "Изменения № 3 к СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
7. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)»

5.2.1 Анализ выявленных вредных производственных факторов

При проведении моделирования и эксперимента на микротроне, важно учитывать влияние вредных производственных факторов, представленных в таблице 5.1. Рассмотрим каждый из них.

5.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата

Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [43] предназначены для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата рабочих мест, производственных помещений на самочувствие, функциональное состояние, работоспособность и здоровье человека.

Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Оптимальные величины показателей микроклимата [43]

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	20-24	60-40	0,1
Теплый	22-24	21-25	60-40	0,1

В холодный период года – отопление и вытяжная вентиляция, а в теплый период – естественная и приточная вентиляции поддерживают температуру воздуха на рабочих местах.

5.2.1.2 Превышение уровня шума

Основными источниками шума в лаборатории, в которой находится микротрон, являются привода, пробой разрядника, криогенный и вакуумный насосы и другие движущиеся детали. При работе с персональным компьютером основным источником шума является его система охлаждения, который чаще всего представляет из себя вентилятор. Повышенный шум на рабочем месте оказывает вредное влияние на организм работника в целом, вызывая неблагоприятные изменения в его органах и системах. Длительное воздействие такого шума способно привести к развитию у работника потери слуха, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечно-сосудистой, нервной системы и др. При этом специфическим клиническим проявлением вредного действия шума является стойкое нарушение слуха (тугоухость), рассматриваемое как профессиональное заболевание. Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания.

Согласно санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [44] предельно допустимый уровень звука на рабочем месте определяется исходя из вида трудовой деятельности. При работе на пультовой ускорителя предельно допустимый уровень звука равен 65дБ, а при работе с персоналами компьютером 50 дБ.

5.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Недостаточное освещение влияет на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, на психику человека, его эмоциональное состояние, вызывает усталость центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов.

Для оптимизации условий труда имеет большое значение освещение рабочих мест. Задачи организации освещённости рабочих мест следующие:

обеспечение различимости рассматриваемых предметов, уменьшение напряжения и утомляемости органов зрения. Производственное освещение должно быть равномерным и устойчивым, иметь правильное направление светового потока, исключать слепящее действие света и образование резких теней.

Требования к освещению помещений указаны в СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [45], согласно которому для зрительных работ средней точности, освещенность, при системе общего освещения, должна составлять 400 лк.

Лаборатория оснащена источниками искусственного (общего) освещения, помещение, в котором осуществляется исследовательская работа – источниками естественного (бокового) и искусственного (общего) освещения.

5.2.1.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Основным источником электромагнитных излучений в лаборатории является ускорительная установка. У персонального компьютера основным источником является непосредственно его экран. Длительное воздействие на человека электромагнитных полей промышленной частоты приводит к расстройствам, которые субъективно выражаются жалобами на головную боль в височной и затылочной области, вялость, расстройство сна, снижение памяти, повышенную раздражительность, апатию, боли в сердце, нарушение ритма сердечных сокращений. Могут наблюдаться функциональные нарушения в центральной нервной системе, а также изменения в составе крови.

Воздействие электромагнитного излучения радиочастотного диапазона определяется плотностью потока энергии, частотой излучения, продолжительностью воздействия, режимом облучения, размером облучаемой поверхности тела, индивидуальными особенностями организма. Воздействие электромагнитного излучения может проявляться в различной форме – от незначительных изменений в некоторых системах организма до серьезных нарушений в организме. Поглощение организмом человека энергии электромагнитного излучения вызывает тепловой эффект. Начиная с

определенного предела организм человека, не справляется с отводом теплоты от отдельных органов, и их температура может повышаться. В связи с этим воздействие электромагнитного излучения особенно вредно для тканей и органов с недостаточно интенсивным кровообращением (глаза, мозг, почки, желудок, желчный и мочевой пузыри). Облучение глаз может привести к ожогам роговицы, а облучение ЭМИ СВЧ-диапазона – к помутнению хрусталика – катаракте.

При длительном воздействии электромагнитного излучения радиочастотного диапазона даже умеренной интенсивности могут произойти расстройства нервной системы, обменных процессов, изменения состава крови. Могут также наблюдаться выпадение волос, ломкость ногтей. На ранней стадии нарушения носят обратимый характер, но в дальнейшем происходят необратимые изменения в состоянии здоровья, стойкое снижение работоспособности и жизненных сил.

Требования к безопасным условиям воздействия электромагнитных полей в диапазоне 30 кГц-300 ГГц установлены в СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [46]. Безопасной нормой для человека, в зависимости от частоты волны, считаются следующие показатели:

- до 300 кГц – 25 В/м²;
- 3 МГц – 15 В/м²;
- 30 МГц – 10 В/м²;
- 300 МГц – 3 В/м²;
- свыше 0,3 ГГц – 10 мкВ/см².

5.2.1.5 Повышенный уровень ионизирующих излучений

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека в тканях могут происходить сложные физические, химические и биохимические процессы. Ионизирующие излучения вызывают ионизацию

атомов и молекул вещества, в результате чего молекулы и клетки ткани разрушаются.

Источником ионизирующих излучений в лаборатории является непосредственно сам микротрон. В ходе его работы генерируются электронные пучки с энергиями 6.1 Мэв. При прохождении электронов через поворотные магнитные поля, коллиматоры, фильтры и поглотитель образуется тормозное излучение.

Различают стохастические и нестохастические эффекты воздействия ионизирующего излучения на организм. Эффекты облучения, выявляющиеся с определенного (порогового) значения дозы, называют нестохастическими, или пороговыми. Для них степень тяжести возрастает с увеличением поглощенной дозы. Стохастические, или беспороговые, эффекты облучения возникают при сколь угодно малых дозах. Вероятность возникновения стохастических эффектов пропорциональна дозе, а тяжесть проявления не зависит от дозы (или зависит незначительно). Основные стохастические эффекты: лейкемия (опухолевые заболевания кроветворных тканей) и другие формы злокачественных образований, генетические эффекты. Эти эффекты обычно обнаруживаются через длительное время после облучения и при длительном наблюдении за большими группами населения в десятки и сотни тысяч человек. В соответствии с общепринятой беспороговой теорией зависимости риска стохастических эффектов от дозы воздействие ионизирующего излучения в любой сколь угодно малой дозе рассматривается как дополнительное к существующему фоновому воздействию различных вредных факторов, связанных с риском возникновения стохастических эффектов.

Задача радиационной безопасности – предотвращение пороговых эффектов и минимизация стохастических.

СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» [47] применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или

природного происхождения. В соответствии с НРБ-99/2009 устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал - лица, работающие с техногенными источниками ионизирующего излучения (группа А) или работающие на радиационном объекте или на территории его санитарно-защитной зоны и находящиеся в сфере воздействия техногенных источников (группа Б);
- население - все лица, включая персонал вне работы с источниками ионизирующего излучения.

Основные пределы доз представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Основные пределы доз [47]

Нормируемые величины	Пределы доз	
	персонал (группа А)	население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза в год в хрусталике глаза Коже кистях и стопах	150 мЗв 500 мЗв 500 мЗв	15 мЗв 50 мЗв 50 мЗв

К работе с источниками ионизирующего излучения допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний. Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения, вводятся дополнительные ограничения. Эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц. Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников ионизирующего излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

5.2.1.6 Психофизиологические факторы

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

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

Трудовая деятельность работников непроизводственной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональную активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развитию утомления, переутомления, стрессу.

5.2.1.7 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

В качестве накопителя энергии ускорителя служит генератор импульсных напряжений, напряжение на выходе которого может достигать 400 кВ. В момент работы ускорителя в помещении не могут находиться люди (из-за радиационной обстановки), поэтому наиболее вероятными сценариями поражения электрическим током являются:

- возникновение разряда статически скопившегося электричества;
- попадание под остаточный заряд, сохранившийся на схеме после ее отключения.

Персональный компьютер, используемый в моделировании, питается от общей сети 220 В. Причинами поражения током в этом случае могут являться:

- нарушение заземленности сети;
- нарушения изоляции проводов питания.

Проходя через тело человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие. Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов. Электролитическое – в разложении органической жидкости, в том числе крови, что вызывает нарушение

ее состава, а также ткани в целом. Механическое – в расслоении, разрыве тканей организма. Биологическое – в раздражении и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биологических процессов. Взаимодействуя с биотоками организма, внешний ток может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и вызвать произвольные сокращения мышц.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов регламентируются ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ) [48]. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)» [49]. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок с частотой тока 50 Гц, напряжением выше 1000 В, с глухим заземлением нейтрали не должны превышать значений, указанных в таблице 24.

Таблица 24 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения

Продолжительность воздействия t, с	До 0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	Св.1,0 до 0,5
Предельно допустимое значение напряжения прикосновения U, В	500	400	200	130	100	65

5.3.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов

Рабочая камера, соответствует требованиям технической документации на ускоритель и обеспечивает возможность безопасного проведения работ. Пультовая, площадью более 15 м², соответствует требованиям технической документации на ускоритель. Рабочее место для работы с персональным компьютером также соответствует установленным требованиям.

Для снижения воздействия повышенного шума, источник шума (ускоритель) располагают в отдельном помещении. Персонал при проведении

экспериментов находится в пультовой, отделенной от источника шума металлической дверью и бетонной стеной. Резиновые подложки, установленные под вакуумными насосами, приводят к затуханию колебаний. Для снижения шума в лаборатории необходимо применение звукопоглощающих материалов – перфорированных, минераловатных плит. В качестве глушителей шума можно использовать индивидуальные наушники. Уровень шума от персонального компьютера не превышает установленных норм, поэтому не требуются проводить дополнительных мероприятий.

Рабочая камера ускорителя должна быть оборудована приточно-вытяжной вентиляцией с механическим побуждением, предназначенной для удаления продуктов радиолиза воздуха и других токсических веществ, образующихся при осуществлении радиационных процессов. Система вентиляции должна исключать возможность поступления удаляемого из рабочей камеры ускорителя воздуха в смежные помещения. Для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата, как в лаборатории, так и в помещении, где осуществляется разработка научно-исследовательского проекта, установлена приточно-вытяжная вентиляция. В холодный период года следует применять средства защиты рабочего места от радиационного охлаждения от остекленных поверхностей оконных проемов, а в теплый период – от попадания прямых солнечных лучей. Относительная влажность воздуха должна быть в пределах 40-60%. В помещении, где осуществляется разработка проекта, необходимо обеспечить величину освещенности в 400 лк с использованием для освещения люминесцентные лампы.

Металлический корпус ускорителя служит в качестве защитного экрана, понижающий уровень электромагнитных излучений. Все системы управления ускорительной установки должны быть в пультовой кабине. Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения от экрана персонального компьютера необходимо соблюдать дистанцию (экран должен находится на расстоянии не менее 50 см от пользователя) и периодически совершать перерывы.

Радиационная защита помещений, в которых расположен ускоритель, должна изготавливаться из материалов, наиболее эффективно ослабляющих первичное электронное или тормозное излучение, обеспечивающих наименьший выход вторичного излучения (тормозного, нейтронного и др.) и эффективное их ослабление. Радиационная защита от всех видов ионизирующего излучения, возникающего при работе ускорителя, должна проектироваться таким образом, чтобы суммарные годовые эффективные дозы облучения персонала и населения не превышали величин, регламентируемых НРБ-99/2009 [47]. При этом следует учитывать максимальное время работы ускорителя в течение года и вводить коэффициент запаса, равный 2.

В рабочем помещении микротрона осуществляется проведение работ с источниками переменного высокого напряжения. Помещение для работы с высоковольтными источниками должно соответствовать требованиям безопасности: в нем не должны присутствовать токопроводящие полы и источники токопроводящей пыли; относительная влажность не должна превышать 75%, а температура – 35 °С; также необходимо исключить возможность одновременного прикосновения к металлическим заземленным элементам и металлическим корпусом [50]. В этих целях требуется не только обеспечить надлежащую изоляцию токоведущих частей, но и защитить их от разрушения изоляции, заключив проводку в защитную оболочку и закрепив вне путей прохождения персонала [50]. Питание персонального компьютера осуществляется посредством подключения его к сети переменного напряжения амплитудой 220 В. Помещение с персональным компьютером также относится к безопасным за счет отсутствия опасных факторов, описанных ранее. Соответственно, меры для исключения воздействия фактора аналогичны приведенным для эксплуатации ускорителя.

Для минимизации вреда от психофизиологических факторов во время исследовательской работы рекомендуется выделять не менее 10% рабочего времени на отдых. Также следует избегать длительной монотонной работы.

Возможно минимизировать стрессовые ситуации с помощью качественного планирования работы.

5.3 Экологическая безопасность

Основным фактор воздействия рассматриваемого ускорителя на окружающую среду является выбросы газообразных токсичных веществ, образующихся при непосредственной работе микротрона. Основными источниками загрязнения являются продукты радиолиза воздуха. В результате него образуются такие токсические вещества, как озон (O_3 , ПДК = 0,1 мг/м³), двуокись азота (NO_2 , ПДК = 2,0 мг/м³), окись углерода (CO , ПДК = 30 мг/м³), стирол (C_8H_8 , ПДК = 5,0 мг/м³), малеиновый ангидрид ($C_4H_2O_3$, ПДК = 1,0 мг/м³), фталевый ангидрид ($C_8H_4O_3$, ПДК = 1,0 мг/м³). Все данные вещества выводятся в атмосферу через систему вентиляции. Для уменьшения концентрации токсических веществ рассчитывают и устанавливают специальные адсорбирующие фильтры. Также выбросы производятся с определенных высот, так чтобы концентрация опасных веществ у земли не превышало ПДК.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При проведении исследований типичной чрезвычайной ситуацией является пожар. Данная ЧС может возникнуть в следующих случаях:

- короткое замыкание в цепи;
- перегрев оборудования, причиной которого является неправильная эксплуатация.

Пожарная безопасность помещения должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями. Пожарная защита должна обеспечиваться применением средств пожаротушения, а также применением автоматических установок пожарной сигнализации.

Должны быть приняты следующие меры противопожарной безопасности:

- обеспечение эффективного удаления дыма;
- обеспечение правильных путей эвакуации;

- наличие огнетушителей и пожарной сигнализации;
- соблюдение всех противопожарных требований к системам отопления и кондиционирования воздуха.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации. План эвакуации представляет собой заранее разработанную схему, на которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации.

В случае возникновения пожара необходимо:

- сообщить о ЧС ответственному работнику или позвонить в службу пожаротушения;
 - отключить питание установки;
 - при возникновении угрозы жизни необходимо покинуть опасную зону.
- При возникновении небольшого пожара необходимо воспользоваться ручным огнетушителем и потушить возгорание;

Для недопущения пожара:

- перед работой необходимо проверять все технологические узлы установки;
- перед работой необходимо проверять все токоведущие части на предмет повреждения изоляции.

5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность»

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности работников. Далее были проанализированы опасные и вредные факторы, которые могут оказывать воздействие на исследователя, также приведены средства и мероприятия защиты от этих факторов. Проведенный анализ обеспечил комфортные и безопасные условия труда при проведении исследования. Также был выявлен фактор

воздействия проводимой работы на окружающую среду, что позволило обеспечить соблюдение экологической безопасности. Был рассмотрен наиболее вероятный сценарий ЧС, на основе чего были разработаны меры по предупреждению ЧС и необходимые действия при возникновении ЧС.

Заключение

В ходе данной работы был создан численный код для моделирования дифракционного излучения на основе обобщенного метода поверхностных токов, реализованный на языке программирования *Wolfram Language*. Были реализованы различные способы задания геометрии мишени, позволяющие создавать модели различной формы и конфигурации. В ходе тестирования кода была проведена его оптимизация по производительности и точности расчетов, позволившая повысить данные показатели. С использованием экспериментальных данных была произведена верификация программного кода, подтвердившая работоспособность кода и хорошую сходимость результатов моделирования и эксперимента. В коде были реализованы периодические мишени, в частности решётка с прямоугольно-треугольным профилем, свойства дифракционного излучения от которой были исследованы в ходе данной работы. Результаты моделирования и эксперимента подтвердили, что возможно использовать решётку для генерации терагерцового излучения. При этом такой источник позволяет относительно легко регулировать характеристики генерируемого излучения, такие как монохроматичность, частота линии и интенсивность.

Были реализованы криволинейные мишени: спиральная и фокусирующая. Спиральная мишень было предложена в качестве источника закрученного излучения. Для подготовки эксперимента на микротроне Томского политехнического университета с целью исследования свойств «закрученных» фотонов были подобраны оптимальные размеры с помощью компьютерного моделирования с использованием реализованного кода.

Были изучены свойства фокусирующей мишени. Полученные результаты подтвердили, что компьютерная модель позволяет учитывать фокусировку излучения. Также результаты показали возможность применения таких мишеней для усиления интенсивности излучения в нужной точке пространства. Однако данная часть работы требует более глубокого исследования, с выявлением всех факторов, влияющих на фокусирующие свойства мишени.

Список литературы

1. Потылицын А.П. и др. Дифракционное излучение релятивистских частиц: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 347 с.
2. Beam Diagnostics // Proceedings of the CERN Accelerator School Course [Электронный ресурс] – URL: <http://cdsweb.cern.ch/record/1071486/files/cern-2009-005.pdf> (дата обращения 19.05.2019).
3. L. Bobb et al. Feasibility of diffraction radiation for noninvasive beam diagnostics as characterized in a storage ring // Journal of physical review accelerators and beams. – 2018. – V. 21. – P. 032801.
4. J. Walsh, J. Brownell, C. Swartz et al. A new far infrared free-electron laser // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 1999. – V. 429. – p. 457–461.
5. H. Andrews, C. Brau. Gain of a Smith-Purcell free-electron laser // Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. – 2004. – V. 7. – P. 070701.
6. A. Kesar. Smith–Purcell radiation from a charge moving above a finite-length grating// Phys. Rev. ST Accel. Beams. – V. 8. – P. 072801.
7. CST STUDIO SUITE 2020 [Электронный ресурс] – URL: http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml / (дата обращения 19.12.2019).
8. Shkitov D.A. Code for simulation of diffraction radiation from flat finite surfaces // Proceedings of RuPAC2018, Protvino. – 2018. – P. 510.
9. Коньков А.С. Характеристики поляризационного излучения заряженных частиц и магнитных моментов: диссертация на соискание уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. – Томск, 2015. – 134 с.
10. Рязанов М.И., Тилинин И.С. Переходное излучение ультрарелятивистской частицы от искривленной поверхности раздела сред // ЖЭТФ. – 1976. – Т.71, № 6(12). – С. 2078 – 2084.
11. Карловец Д.В., Потылицын А.П. Дифракционное излучение от экрана конечной проводимости // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 90, № 5. – С. 368 – 373.

12. Рязанов М.И. Пределы применимости макроскопической теории переходного излучения // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т. 39, № 12. – С. 569 – 571.
13. Текущая версия кода [Электронный ресурс] – URL: <https://filecloud.tpu.ru/index.php/s/IhxTCAgGsKLGs8o> (дата обращения 28.05.2020).
14. Wolfram Language & System Documentation Center [Электронный ресурс] – URL: <https://reference.wolfram.com/language/> (дата обращения 19.05.2020).
15. Wolfram Language & System Documentation Center. NIntegrate Integration Strategies [Электронный ресурс] – URL: <https://reference.wolfram.com/language/tutorial/NIntegrateIntegrationStrategies/> (дата обращения 28.05.2020).
16. Блог Wolfram Mathematica [Электронный ресурс] – URL: <https://blog.wolframmathematica.ru/2208/07-11-2019/> (дата обращения 25.02.2020).
17. Дышеков А.А. Оптимизация и тестирование численного кода для расчёта характеристик дифракционного излучения от плоских мишеней // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 3-7 Декабря 2018. – Томск: ТПУ, 2019 – С. 46-47
18. T. Muto, S. Araki, R. Hamatsu, et al., Observation of incoherent diffraction radiation from a single-edge target in the visible-light region // PRL – 2003. – V. 90, – P. 104801.
19. A. Kaboth, J. Monroe, et al., A measurement of photon production in electron avalanches in CF₄. Nuclear // Instruments and Methods in Physics – Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2008. – V. 592. – P. 63.
20. P. Karataev, S. Araki, R. Hamatsu, et al., Beam-Size Measurement with Optical Diffraction Radiation at KEK Accelerator Test Facility // PRL – 2004. – V. 93, – P. 244802.
21. Физики создали источник терагерцовых волн с рекордно широким спектром // N+1: Интернет-изд. 2020. 19 Март. URL: <https://nplus1->

ru.turbopages.org/s/nplus1.ru/news/2020/03/19/thz-pulse (дата обращения 28.05.2020).

22. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения // УФН. –2011. – Т. 181. – № 8. – С. 867-874.

23. Терагерцевое излучение: использование в системах досмотра [Электронный ресурс] – URL: <http://www.bezopasnost.ru/about/articles/detail/253/1465/> (дата обращения 28.02.2020).

24. Дышеков А.А. Периодические мишени для моделирования переходного и дифракционного излучения // Инструментальные методы и техника экспериментальной физики: материалы 57-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 14-19 Апреля 2019. – Новосибирск: НГУ, 2019 – С. 6

25. Дышеков А.А., Токтаганова М.М. Свойства терагерцевого излучения от решётки, генерируемого релятивистским электронным пучком // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 т., Томск, Апрель 2019. – Томск: ТПУ, 2019 – Т. 1. Физика (принято к публикации).

26. Веригин Д.А. Наблюдение стимулированного когерентного дифракционного излучения и исследование его характеристик: диссертация на соискание уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. – Томск, 2017. – С. 29-44.

27. Токтаганова М.М. Моделирование форм фактора последовательности ступок для расчёта переходного излучения // МСИТ: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск, 17-20 Февраля 2020. –Томск: ТПУ, 2020 – С. 136-137.

28. Вуколов А. В. Оптическое излучение Смита-Парселла, генерируемое пучком электронов нерелятивистских энергий: диссертация на соискание уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. – Томск, 2006. – С. 3.

29. Shkitov D.A, et al. Monochromaticity of transition radiation and diffraction radiation from grating // Proceedings of 13 International Symposium on Radiation from relativistic electrons in periodic structures, Belgorod, 2019. – С. 121.

30. Князев Б.А., Сербов В.Г. Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты // УФН, 2018. – Т. 188. – №5. – С. 508-539.
31. F. Tamburini, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test// New Journal of Physics – 2012. – V. 14. – P. 033001.
32. Дышеков А.А. Моделирование свойств «закрученного» излучения, генерируемого электронами от спиральной мишени // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 17-20 Февраля 2020. – Томск: ТПУ, 2020 – С. 35-36.
33. Виноградов И.М. Геликоид // Математическая энциклопедия. / И.М. Виноградов – Москва: Изд-во "Советская энциклопедия", 1977 – Т.1 – С. 913.
34. Смирнов В.И. Курс высшей математики: Учебное пособие / В.И. Смирнов – Москва: Изд-во "Наука", 1974. – Т.2 – 479 с.
35. Сухих Л.Г. Фокусировка переходного и дифракционного излучения изогнутыми мишенями: диссертация на соискание уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. – Томск, 2009. – 107 с.
36. Задорожный В.Н. Высшая математика для технических университетов. Часть II. Аналитическая геометрия: Учебное пособие / В.Н. Задорожный, В.Ф. Зальмеж, А.Ю. Трифонов, А.В. Шаповалов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 398 с.
37. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ.
38. СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ».
39. ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
40. ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
41. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

- 42.ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
- 43.СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
- 44.СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».
- 45.СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение».
- 46.СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
- 47.СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».
- 48.ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ).
- 49.Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)».
- 50.ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты: Введ. 2019-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.