

**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 ядерного топливного цикла

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Моделирование когерентного излучения последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительностей</b>

УДК 621.384.665

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Б	Токтаганова Маржан Мейрамхановна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор, ведущий научный сотрудник 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.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

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.		

Томск – 2020 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (компетенции)
<b>Общекультурные компетенции</b>	
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.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
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.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

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

---

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
0А6Б	Токтаганова Маржан Мейрамхановна

Тема работы:

Моделирование когерентного излучения последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительностей	
Утверждена приказом директора	№59-92/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования – когерентное излучение. Предмет исследования – модели спектров переходного излучения от последовательностей электронных сгустков с различными пространственными параметрами. Материал исследования – русско- и англоязычные научные работы по теме.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Аналитический обзор литературных источников, формирующих научно-теоретическую базу исследования</li><li>2. Дополнение теоретической базы введением новых параметров используемых при расчете спектрально-угловых характеристик когерентного излучения.</li><li>3. Разработка инструментов для проведения расчета спектрально-угловых характеристик излучения аналитическим методом моделирования.</li><li>4. Разработка нового метода расчета спектрально-угловых характеристик излучения, базирующегося на принципах прямого численного моделирования.</li></ol>

	<p>5. Поиск статей содержащих описание существующих последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундных длительностей.</p> <p>6. Выборка параметров последовательностей электронных сгустков, представленных в найденных статьях для проведения моделирования спектров переходного излучения с помощью разработанных программных инструментов.</p> <p>7. Описание полученных спектров.</p> <p>8. Анализ влияния параметров последовательностей сгустков на характеристики выходного излучения.</p> <p>9. Определение результатов работы и перспектив дальнейшего исследования.</p>
--	--

<b>Перечень графического материала</b>	Презентация
--	-------------

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Теоретическая часть	Младший научный сотрудник ИШФВП Шкитов Дмитрий Андреевич
Расчётная часть	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ Гоголева Татьяна Сергеевна

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

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Б	Токтаганова Маржан Мейрамхановна		

**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)
4.01.20	Составление и утверждение технического задания	5
2.03.20	Подбор и изучение материалов по теме	10
10.04.20	Выбор направления исследования	5
3.05.20	Дополнение теории и создание расчетных программ	40
20.05.20	Проведение моделирования	20
8.06.20	Анализ и описание результатов	15
12.06.20	Подготовка к защите ВКР	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор, ведущий научный сотрудник 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:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А6Б	Токтагановой Маржан Мейрамхановне

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

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

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

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

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

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)**

1. <i>Оценка конкурентоспособности НИ</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Диаграмма Ганта</i>
4. <i>Бюджет НИ</i>
5. <i>Основные показатели эффективности НИ</i>

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А6Б	Токтаганова Маржан Мейрамхановна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А6Б	Токтагановой Маржан Мейрамхановне

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

Тема ВКР:

Моделирование когерентного излучения последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительностей	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: модель спектра когерентного излучения. Область применения: физика высоких энергий.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 года № 197-ФЗ; – ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень шума; – психофизиологические факторы; – опасность поражения электрическим током.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; – организационные и технические мероприятия по защите окружающей среды.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– выбор и описание типичной ЧС – пожар; – обоснование мероприятий по предотвращению ЧС; – порядок действий при возникновении ЧС.

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А6Б	Токтаганова Маржан Мейрамхановна		

## СОДЕРЖАНИЕ

Реферат .....	11
ВВЕДЕНИЕ .....	12
1. Теория и создание инструментов для проведения моделирования .....	15
1.1 Вывод формулы полного спектрально-углового распределения излучения .....	15
1.2 Расчёт форм-фактора последовательностей электронных сгустков .....	18
1.2.1 Расчёт разности фаз для переходного и дифракционного излучения .....	18
1.2.3 Форм-фактор для равномерной последовательности сгустков .....	29
1.2.4 Учет пространственного распределения заряда .....	31
1.2.5 Учет произвольного расстояния между сгустками .....	32
1.2.6 Учет поперечного смещения сгустков в последовательности .....	33
1.2.7 Учет произвольности размеров сгустков в последовательности .....	34
1.2.8 Приближения, допущения и ограничения подхода .....	35
1.3 Программы для расчёта форм-фактора аналитическим методом .....	37
1.4 Вычисление форм-фактора численным методом .....	39
1.5 Выводы по разделу .....	44
2. Моделирование и анализ спектров излучения .....	46
2.1 Краткий обзор методов генерации последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительностей .....	46
2.2 Характеристики электронных пучков .....	47
2.3 Расчет характеристик когерентного переходного излучения назад .....	49
2.4 Анализ форм-фактора для произвольного распределения сгустков .....	64
2.5 Выводы по разделу .....	73
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	75
3.1 Оценка коммерческого потенциала проводимого НИ .....	75
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений .....	75
3.1.2 SWOT-анализ .....	77
3.2 Планирование НИР .....	78
3.2.1. Структура работ в рамках НИР .....	78
3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения работ .....	79
3.3 Бюджет научного исследования .....	83
3.3.1 Материальные затраты на НИ .....	83
3.3.2 Расчет амортизации специального оборудования .....	84
3.3.3 Основная заработная плата .....	85
3.3.4 Дополнительная заработная плата .....	86
3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	87
3.3.6 Накладные расходы .....	87
3.4 Определение ресурсоэффективности исследования .....	88
3.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности .....	88
3.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности .....	90
3.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки .....	91
3.5 Выводы по разделу .....	91

4. Социальная ответственность .....	93
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	93
4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	93
4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	94
4.2 Производственная безопасность .....	97
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов .....	97
4.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов .....	98
4.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата.....	98
4.2.2.2 Повышенный уровень электромагнитного излучения .....	99
4.2.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	100
4.2.2.4 Превышение уровня шума .....	101
4.2.2.5 Психофизиологические факторы.....	101
4.2.2.6 Поражение электрическим током .....	102
4.3 Экологическая безопасность .....	104
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	105
4.4.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования .....	105
4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС .....	106
4.5 Выводы по разделу .....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	108
Список использованных источников .....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	126

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 128 страниц, 38 рисунков, 26 таблиц, 28 источников.

Ключевые слова: когерентное переходное излучение, когерентное дифракционное излучение, форм-фактор электронных сгустков, последовательность электронных сгустков, сверхкороткие электронные сгустки, аттосекундные сгустки, фемтосекундные сгустки, спектры переходного излучения.

Объектом исследования является когерентное излучение.

Цель работы – исследование свойств переходного излучения от различных последовательностей электронных сгустков, для создания источников высокоинтенсивного монохроматического излучения различных частотных диапазонов.

В процессе исследования проводилось дополнение теории переходного излучения, разработка нового метода моделирования спектров излучения и создание приложений для проведения их моделирования, моделирование спектров переходного излучения от реальных последовательностей сверхкоротких электронных сгустков, анализ влияния параметров электронного пучка на характеристики спектра излучения.

В результате исследования приведены рекомендации к преобразованию последовательностей сгустков для получения излучения с заранее заданными характеристиками, созданы приложения для проведения моделирования, учтено влияние новых параметров на вид спектра излучения, внедрен новый метод расчета спектров переходного и дифракционного излучения.

Область применения: физика высоких энергий, физика ускорителей.

В будущем планируется дополнить теорию еще большим количеством параметров последовательностей сгустков, усовершенствовать разработанные приложения, провести более детальный и расширенный анализ влияния параметров неравномерных последовательностей на спектр излучения.

## ВВЕДЕНИЕ

Когерентностью в общем случае называется согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. Монохроматические волны когерентны, если разность фаз остаётся постоянной во времени (в этом случае говорят о временной когерентности) или по мере распространения в пространстве (пространственная когерентность). Излучение, как известно, это передача энергии в форме волн или частиц через пространство или через материальную среду. Соответственно, если мы рассматриваем излучение с позиции волнового подхода, можно говорить о его когерентности или не когерентности. В данной работе рассматриваются вопросы, касающиеся, в основном, когерентного переходного излучения.

История переходного излучения берет свое начало в работе 1945 года, когда оно было впервые теоретически предсказано В.Л. Гинзбургом и И.М. Франком [1]. Экспериментально описанный эффект был обнаружен в 1959 году в Ереванском физическом институте [2].

Переходное излучение возникает при пересечении заряженной частицей границы раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. В том случае, когда частица пролетает не сквозь границу, а непосредственно вблизи (на расстояниях менее, чем характерный радиус затухания поля электрона  $\sim \beta\gamma\lambda$ , где  $\gamma$  – Лоренц-фактор частицы,  $\beta = \frac{v}{c}$  – относительная скорость частицы в единицах скорости света “с”,  $\lambda$  – длина волны испущенного излучения) оптической неоднородности возникает дифракционное излучение [3]. Сравнительно недавно появились теоретические и экспериментальные работы, в которых авторы продемонстрировали единую природу данных видов излучений и заложили основы теоретического описания всех видов поляризационного излучения [3]. В современном, наиболее распространённом формализме механизм возникновения переходного и дифракционного излучения описывается, как процесс излучения электромагнитных волн при колебании атомных электронов среды,

поляризованных полей налетающей заряженной частицы. Таким образом, на характер излучения влияют, как параметры конфигурации поля и природы частицы или совокупности частиц, так и параметры среды, которая является непосредственным излучателем [4].

В представленной работе границей сред предполагается вакуум - металл, где средой излучателя выступает бесконечная плоская металлическая мишень, а возбудителем среды – электронный сгусток или последовательность электронных сгустков.

Говоря об актуальности темы, стоит отметить, что последнее десятилетие в физике высоких энергий наблюдается тенденция к получению переходного излучения от последовательностей все более и более коротких электронных сгустков. Связанно это с тем, что излучение от подобных пучков за счёт высокого временного разрешения позволяет исследовать быстропротекающие процессы в явлениях из различных областей науки и техники, таких как биология, химия, материаловедение и т.д. [5]. Уменьшая продольный размер сгустков в последовательности, можно добиться смещения порога когерентности излучения в коротковолновую область, и получить на выходе высокочастотное излучение большой интенсивности. Чем быстрее во времени протекает исследуемый процесс, тем выше должна быть частота получаемого излучения. Для этих целей усилиями многих стран мира собираются огромные научно-исследовательские установки. Ярчайшим примером таких установок на сегодняшний день является European XFEL [5] – европейский рентгеновский лазер на свободных электронах.

Следует также сказать обо всё ускоряющемся продвижении мощных электровакуумных приборов из микроволнового диапазона в диапазон терагерцевых волн и их использование для новых приложений. Большие перспективы создания относительно компактных и мощных источников научное сообщество связывает с терагерцевыми источниками на базе механизма всё того же переходного излучения.

Целью работы является исследование свойств переходного излучения от различных последовательностей электронных сгустков, для создания источников высокоинтенсивного монохроматического излучения различных частотных диапазонов. В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- Дополнение теории переходного излучения ранее не рассматриваемыми параметрами последовательностей электронных сгустков;
- Создание кода для аналитического моделирования спектров переходного излучения от последовательностей электронных сгустков на языке Wolfram Language;
- Разработка нового прямого численного метода моделирования спектров переходного излучения; оптимизация кода созданного для реализации данного метода;
- Поиск параметров уже существующих последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундных длительностей в научных статьях последних двух десятилетий;
- Моделирование и анализ спектров переходного излучения от найденных в статьях последовательностей электронных сгустков.
- Выявление закономерностей влияния параметров последовательностей электронных сгустков на характер излучения; выработка рекомендаций к преобразованиям параметров последовательностей электронных сгустков для получения высокоинтенсивного монохроматического излучения, в соответствии с выявленными закономерностями.

## 1. Теория и создание инструментов для проведения моделирования

Глава посвящена формированию теоретической и инструментальной базы для проведения моделирования реальных спектров переходного и дифракционного излучения от различных последовательностей электронных сгустков.

В частности, в главе приводятся выводы формул для полного спектрально-углового распределения переходного и дифракционного излучений от самой простой структуры источника возмущающего поля – единичного электронного сгустка, до всё более сложных структур, учитывающих, в конце концов, практически все возможные пространственные параметры последовательности электронных сгустков. Описываются программы, созданные на базе полученных выражений. Предлагается новый прямой подход для вычисления форм-фактора пучка при расчётах спектров излучения, базирующийся на принципах численного моделирования. Выделены ограничения и пределы применимости изложенных подходов.

### 1.1 Вывод формулы полного спектрально-углового распределения излучения

Представим последовательный вывод общего выражения для полной интенсивности поляризованного излучения от одного сгустка заряженных частиц представленный в работе [6]. Запишем выражение в приближении, что возмущающее поле не зависит от изменения координат отдельных частиц внутри сгустка.

Поле излучения от всех электронов сгустка можно представить суммой полей излучения каждого отдельного электрона в этом сгустке:

$$\vec{E}(\vec{r}, \omega) = \sum_{j=1}^N \vec{E}_j(\vec{r}_j, \omega),$$

где  $\vec{r}_j$  – координата  $j$ -ого электрона в сгустке, в системе координат связанной с мишенью,  $N$  – количество электронов в сгустке,  $\omega$  – круговая частота исследуемого излучения,  $\vec{r}$  – координата центра сгустка, в системе координат

связанной с мишенью,  $\vec{E}_j(\vec{r}_j, \omega)$  – электрическая компонента напряженности поля  $j$ -ого электрона в сгустке.

В свою очередь, поле излучения от  $j$ -ого электрона в сгустке можно записать как произведение напряжённости электрической компоненты в дальней волновой зоне  $\vec{E}_0(\vec{r}, \omega)$  центрального электрона и экспоненциальной части, степень которой включает в себя фазу искомого излучения  $\varphi$ :

$$\vec{E}_j(\vec{r}_j, \omega) = \vec{E}_0(\vec{r}, \omega) \cdot e^{i\varphi}$$

$$\varphi = \omega \left( \frac{\vec{s} \cdot \vec{r}_j}{c} \right),$$

здесь,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\vec{s}$  – вектор, определяющий тип излучения (это может быть переходное, дифракционное или синхротронное излучение и т.д.). Таким образом, выражение для поля от всех электронов сгустка запишется в виде:

$$\vec{E}(\vec{r}, \omega) = \vec{E}_0(\vec{r}, \omega) \cdot \sum_{j=1}^N e^{i\omega \left( \frac{\vec{s} \cdot \vec{r}_j}{c} \right)}$$

Наконец, запишем выражение для интенсивности излучения:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = cL^2 \cdot \vec{E}_0(\vec{r}, \omega) \cdot \vec{E}_0^*(\vec{r}, \omega) \cdot \sum_{j=1}^N e^{i\omega \left( \frac{\vec{s} \cdot \vec{r}_j}{c} \right)} \sum_{p=1}^N e^{-i\omega \left( \frac{\vec{s} \cdot \vec{r}_p}{c} \right)},$$

где  $L$  – расстояние до точки наблюдения.

Обозначим  $\frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} = cL^2 \cdot \vec{E}_0(\vec{r}, \omega) \cdot \vec{E}_0^*(\vec{r}, \omega)$  – интенсивность излучения

единичного электрона, и запишем предыдущее выражение в более компактном виде:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^N e^{i\frac{\omega \vec{s}}{c} \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_p)}.$$

Разобьем данное выражение на сумму двух слагаемых, одно из которых будет представлять сумму диагональных элементов матрицы  $\frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^N e^{i\frac{\omega \vec{s}}{c}(\vec{r}_j - \vec{r}_p)}$ ,

когда  $p = j$ , а второе – сумму недиагональных элементов, когда  $p \neq j$ .

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot \left( \sum_{p=1}^N \sum_{p=1}^N e^{i\frac{\omega \vec{s}}{c}(\vec{r}_p - \vec{r}_p)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^N \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^N e^{i\frac{\omega \vec{s}}{c}(\vec{r}_j - \vec{r}_p)} \right)$$

Поскольку показатель степени экспоненты в первом слагаемом всегда равен нулю, можно записать:

$$\frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot \sum_{p=1}^N \sum_{p=1}^N e^{i\frac{\omega \vec{s}}{c}(\vec{r}_p - \vec{r}_p)} = \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot N.$$

Данное слагаемое соответствует обычному некогерентному излучению  $N$  электронов.

Второе слагаемое соответствует когерентному излучению. Выполним некоторые тождественные преобразования, используя свойства  $\delta$ -функции Дирака [7]:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^N e^{i\frac{\omega \vec{s}}{c}(\vec{r}_j - \vec{r}_p)} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^N e^{i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}_j}{c}\right)} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^N e^{-i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}_p}{c}\right)} = \\ &= \left[ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^N \int e^{i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}}{c}\right)} \delta(\vec{r} - \vec{r}_j) dV \right] \cdot \left[ \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^N \int e^{-i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}'}{c}\right)} \delta(\vec{r}' - \vec{r}_p) dV' \right] = \\ &= \left[ \int e^{i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}}{c}\right)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^N \delta(\vec{r} - \vec{r}_j) dV \right] \cdot \left[ \int e^{-i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}'}{c}\right)} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^N \delta(\vec{r}' - \vec{r}_p) dV' \right] \end{aligned}$$

Далее введем обозначения  $\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^N \delta(\vec{r} - \vec{r}_j) = N\rho(\vec{r})$  и

$\sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^N \delta(\vec{r}' - \vec{r}_p) = (N-1)\rho'(\vec{r}')$ . Очевидно, что  $\rho(\vec{r})$  – точное выражение для

нормированной функции плотности распределения электронов в сгустке. В

случае, когда  $N \gg 1$ ,  $\rho(\vec{r}) \approx \rho'(\vec{r}')$ . При расстояниях между электронами в сгустке намного меньших длины волны исследуемого излучения дискретную функцию  $\rho(\vec{r})$  можно заменить непрерывной нормированной функцией плотности распределения. Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^N \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^N e^{i\frac{\omega \cdot \vec{s}}{c}(\vec{r}_j - \vec{r}_p)} &= \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot N(N-1) \int e^{i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}}{c}\right)} \rho(\vec{r}) dV \cdot \int e^{-i\omega \left(\frac{\vec{s} \cdot \vec{r}'}{c}\right)} \rho'(\vec{r}') dV' = \\ &= \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot N(N-1) \cdot F(\omega, \vec{s}), \end{aligned}$$

$$F(\omega, \vec{s}) = \int e^{i\frac{\omega}{c}(\vec{s} \cdot \vec{r})} \rho(\vec{r}) dV \cdot \int e^{-i\frac{\omega}{c}(\vec{s} \cdot \vec{r}')} \rho'(\vec{r}') dV' = \left| \int e^{i\frac{\omega}{c}(\vec{s} \cdot \vec{r})} \rho(\vec{r}) dV \right|^2,$$

где  $F(\omega, \vec{s})$  – форм-фактор сгустка. Данный параметр мы подробнее рассмотрим в следующей части главы.

Таким образом, мы получили выражение для полного спектрально-углового распределения излучения:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \left[ N + N(N-1)F(\omega, \vec{s}) \right] \cdot \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega}.$$

Заметим, что данная формула справедлива для всех видов поляризационного излучения. Разница между ними будет определяться конечным видом форм-фактора пучка заряженных частиц.

## 1.2 Расчёт форм-фактора последовательностей электронных сгустков

### 1.2.1 Расчёт разности фаз для переходного и дифракционного излучения

Теперь, зная формулу полного спектрально-углового распределения излучения, уточним вид форм-фактора для переходного и дифракционного излучения. Как было сказано выше, форм-фактор определяется фазой излучения и пространственным распределением электронов в сгустке:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \int \rho(\vec{r}) e^{i\frac{\omega}{c}(\vec{s} \cdot \vec{r})} dV \right|^2.$$

Определим компоненты вектора  $\vec{s}$  для переходного излучения. Рассмотрим схему формирования переходного излучения в 2D (рисунок 1.1):

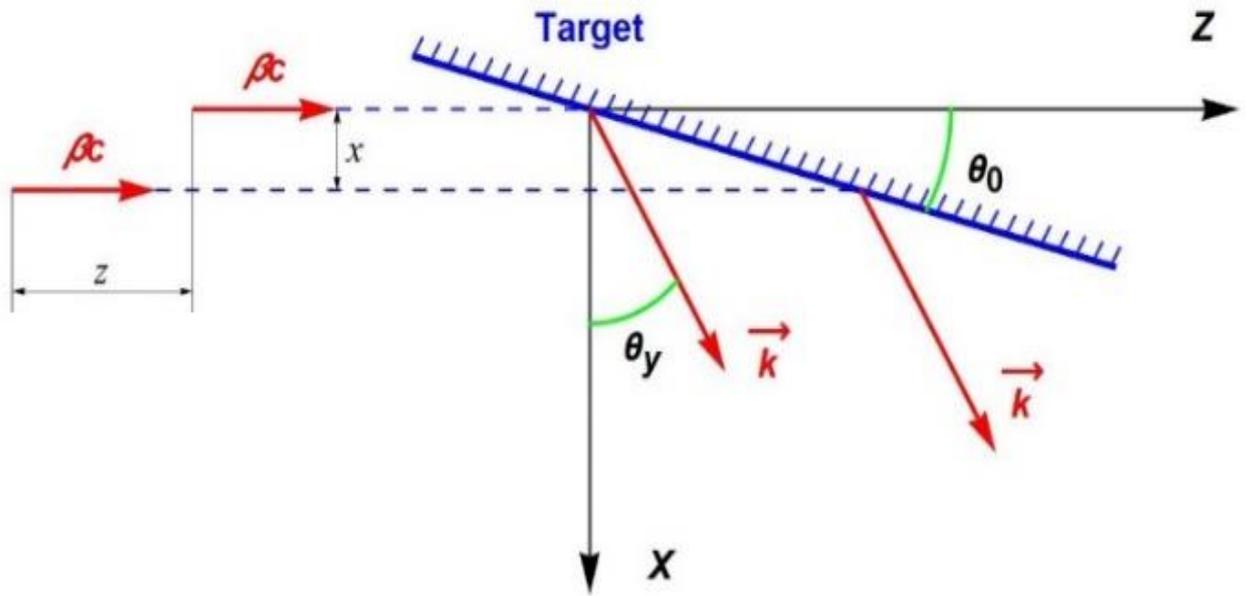


Рисунок 1.1 – Кинематика переходного излучения «назад» в плоскости  $xOz$

Источниками волн переходного излучения будем считать точки, в которых электроны пересекают мишень, наклоненную к направлению скорости электронов под углом  $\theta_0$ . Электрон, расположенный в центре сгустка, пересекает мишень в начале координат  $\vec{r}_0 = \{0,0,0\}$ , а электрон с поперечными координатами  $\{x, y\}$  в точке  $\vec{r} = \{x, y, x \cdot \cot \theta_0\}$  [8]. Фаза излучения в этом случае определяется временным интервалом, от момента пересечения центральным электроном мишени, до момента, когда излучение, индуцированное двумя электронами, будет проходить равное расстояние до детектора, расположенного перпендикулярно к распространению излучения. В свою очередь, этот временной интервал можно разделить на две части (рисунок 1.2) [6]:

$$\omega \left( \frac{\vec{s} \cdot \vec{r}}{c} \right) = \omega(t_1 - t_2)$$

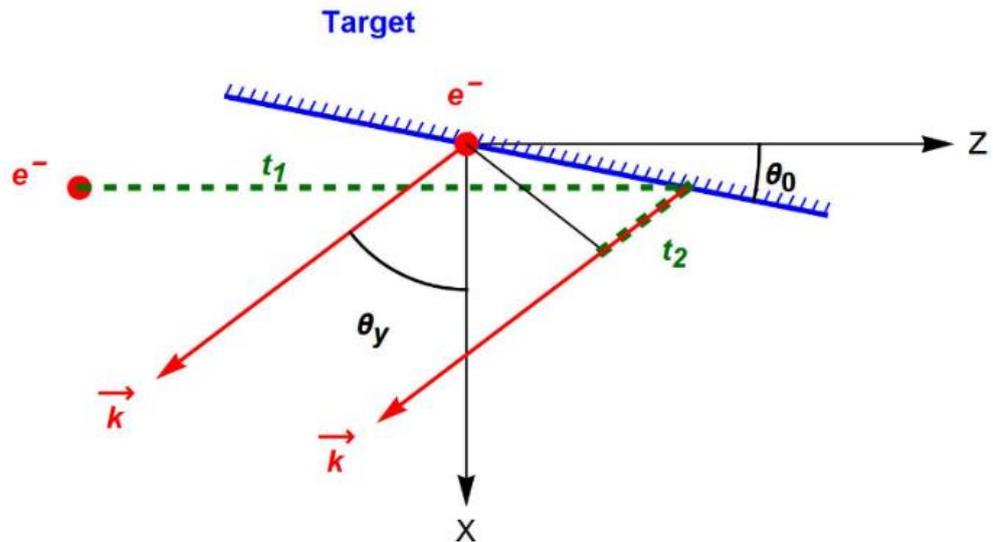


Рисунок 1.2 – К пояснению формирования фазы излучения (проекция на плоскость  $xOz$ )

Первый интервал представляет собой время, затраченное электроном с ненулевыми поперечными координатами на “полет” до мишени, и его можно выразить как отношение пройденного этим электроном пути  $S$  до мишени к его скорости  $v$ :

$$t_1 = \frac{S}{v} = \frac{x \cdot \cot \theta_0 - z}{\beta c},$$

где  $\beta$  – отношение скорости электронов  $v$  к скорости света  $\beta = \frac{v}{c}$ , называемое так же безразмерной скоростью и выражающееся через Лоренц-фактор как  $\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$ . Заметим, что знак «минус» перед  $z$ -координатой второго электрона нивелирует знак самой  $z$ -координаты, то есть, если искомый электрон опережает центральный электрон, а не отстает от него, то он проходит расстояние до мишени меньше  $x \cdot \cot \theta_0$ , тогда отрицательный знак сохраняется, и напротив, если электрон отстает от центрального, как это показано на рисунках 1.1 и 1.2, он проходит расстояние больше  $x \cdot \cot \theta_0$  и знак становится положительным.

Второй временной интервал связан с расстоянием, которое должно пройти индуцированное электроном излучение, до точки, когда излучение от

первого и второго электронов будут проходить одинаковое расстояние до детектора, причем не всегда этот путь должно проходить излучение индуцированное “нецентральным” электроном. Так в роли “догоняющего” излучения может выступать излучение от центрального электрона, как правило, это зависит от углов задающих направление волнового вектора излучения (который так же может быть интерпретирован как вектор наблюдения, т.е. положение детектора излучения в пространстве), наклона мишени относительно направления распространения электронов и координаты “нецентрального” электрона.

Для рассмотрения геометрии формирования фазы на этот раз обратимся к трехмерным схемам, поскольку точное аналитическое выражение для временного интервала  $t_2$  в отличие от  $t_1$  как правило вызывает трудности, связанные с работой в пространстве и необходимостью предельно точного аналитического выражения направления волнового вектора (рисунок 1.3).

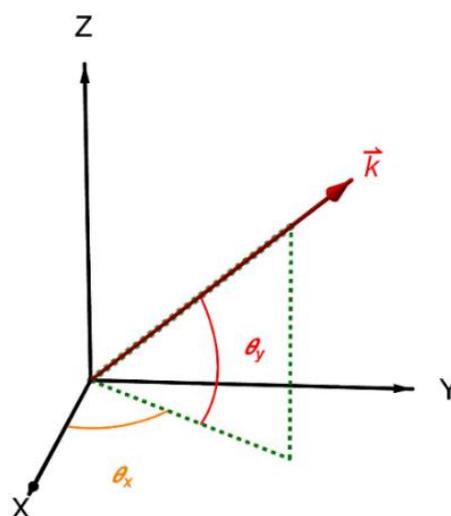
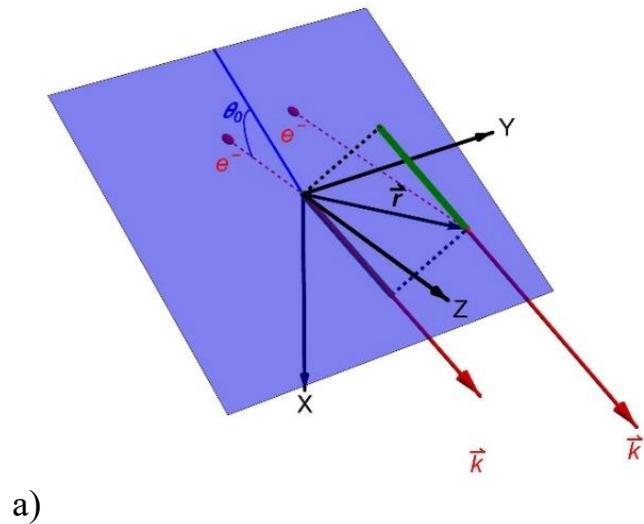


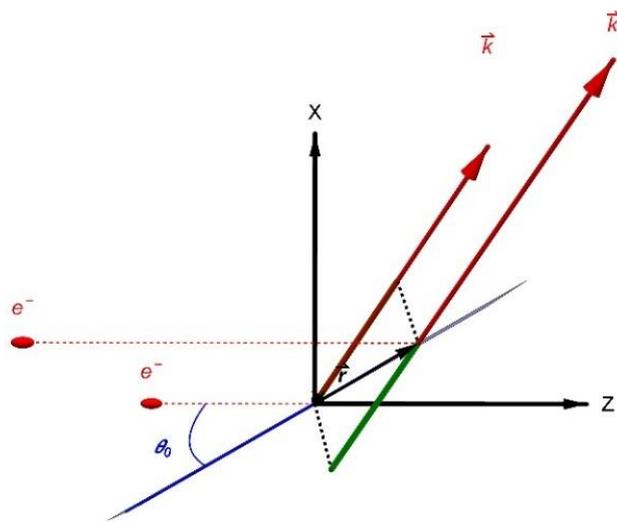
Рисунок 1.3 – К выражению направления волнового вектора в 3D

В данной работе направление нормированного волнового вектора в пространстве задается углами  $\theta_y, \theta_x$ :

$$\bar{k} = \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} = \{ \cos \theta_y \cos \theta_x, \cos \theta_y \sin \theta_x, \sin \theta_y \},$$



а)



б)

Рисунок 1.4 – Кинематика переходного излучения «назад» в 3D (а), кинематика переходного излучения «назад» вид сбоку (б)

а временной интервал  $t_2$ , находится как проекция вектора  $\vec{r} = \{x, y, x \cdot \cot \theta_0\}$  на вектор  $\vec{k}$  (рисунок 1.4) деленный на скорость излучения, то есть скорость света:

$$t_2 = \frac{|\vec{r}| \cdot \cos(\vec{k}, \vec{r})}{c} = |\vec{r}| \frac{\vec{r} \cdot \vec{k}}{|\vec{r}| \cdot |\vec{k}| \cdot c} = \frac{\vec{r} \cdot \vec{k}}{c}.$$

Таким образом, второй временной интервал определяется выражением:

$$t_2 = \frac{x \cdot \cos \theta_y \cos \theta_x + y \cdot \cos \theta_y \sin \theta_x + x \cdot \cot \theta_0 \sin \theta_y}{c}.$$

Проверим полученную формулу используя методы аналитической геометрии, для этого найдем координаты проекции точки  $\vec{r} = \{x, y, x \cdot \cot \theta_0\} = \{x_1, y_1, z_1\}$  на прямую, с направляющим вектором

$$\vec{k} = \{k_1, k_2, k_3\} = \{\cos \theta_y \cos \theta_x, \cos \theta_y \sin \theta_x, \sin \theta_y\}$$

и проходящую через точку  $\{0, 0, 0\}$ . Запишем каноническое уравнение данной прямой:

$$\frac{x}{k_1} = \frac{y}{k_2} = \frac{z}{k_3}.$$

Далее найдем вид уравнения прямой, перпендикулярной данной и проходящей через точку  $\vec{r}$ :

$$k_1(x - x_1) + k_2(y - y_1) + k_3(z - z_1) = 0.$$

Выразим компоненты  $y$  и  $z$  через компоненту  $x$ :

$$\frac{x}{k_1} = \frac{y}{k_2} \quad \Rightarrow \quad y = x \frac{k_2}{k_1},$$

$$\frac{x}{k_1} = \frac{z}{k_3} \quad \Rightarrow \quad z = x \frac{k_3}{k_1}.$$

И подставим в формулу для прямой перпендикулярной данной:

$$k_1(x - x_1) + k_2\left(x \frac{k_2}{k_1} - y_1\right) + k_3\left(x \frac{k_3}{k_1} - z_1\right) = 0.$$

Выразим компоненту  $x$  явно:

$$x = k_1 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right)$$

И подставим в выражение для компонент  $y$  и  $z$ :

$$y = x \frac{k_2}{k_1} = k_2 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right),$$

$$z = x \frac{k_3}{k_1} = k_3 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right).$$

Таким образом, мы нашли координаты проекции точки  $\vec{r}$  на вектор  $\vec{k}$  :

$$\left\{ k_1 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right), k_2 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right), k_3 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right) \right\}.$$

Определим длину направляющего вектора этой точки:

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left[ k_1 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right) \right]^2 + \left[ k_2 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right) \right]^2 + \left[ k_3 \left( \frac{x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \right) \right]^2} = \\ & = \sqrt{\frac{(x_1 k_1 + y_1 k_2 + z_1 k_3)^2}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}} = \sqrt{\frac{(x \cdot \cos \theta_y \cos \theta_x + y \cdot \cos \theta_y \sin \theta_x + x \cdot \cot \theta_0 \sin \theta_y)^2}{(\cos \theta_y \cos \theta_x)^2 + (\cos \theta_y \sin \theta_x)^2 + (\sin \theta_y)^2}} = \\ & = x \cdot \cos \theta_y \cos \theta_x + y \cdot \cos \theta_y \sin \theta_x + x \cdot \cot \theta_0 \sin \theta_y. \end{aligned}$$

Данное выражение соответствует полученному ранее выражению для числителя  $t_2$ . Помимо методов аналитической геометрии убедиться в правильности полученного выражения можно с помощью созданной программы-визуализатора (приложение А), реализованной в пакете Wolfram Mathematica (версия 11.3) [9]. Зная точный вид  $t_1$  и  $t_2$  для представленной геометрии, запишем полное выражение для разности фаз излучения:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{s} \cdot \vec{r}}{c} &= \frac{x \cdot \cot \theta_0 - z}{\beta c} - \frac{(x \cdot \cos \theta_y \cos \theta_x + y \cdot \cos \theta_y \sin \theta_x + x \cdot \cot \theta_0 \sin \theta_y)}{c} = \\ &= \frac{-x \left( \cos \theta_y \cos \theta_x + \cot \theta_0 \left( \sin \theta_y - \frac{1}{\beta} \right) \right) - y \cdot \cos \theta_y \sin \theta_x - z \cdot \frac{1}{\beta}}{c}. \end{aligned}$$

Заключаем, что компоненты вектора  $\vec{s}$  для переходного излучения в представленной геометрии будут иметь следующий вид:

$$\vec{s} = \begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\cos \theta_y \cos \theta_x - \cot \theta_0 \left( \sin \theta_y - \frac{1}{\beta} \right) \\ -\cos \theta_y \sin \theta_x \\ -\frac{1}{\beta} \end{Bmatrix}.$$

Данные компоненты отличаются от полученных в работе [6] для той же геометрии. Причина этого расхождения заключается в том, что не совсем ясно, как в вышеупомянутой работе выражается волновой вектор. Из-за этого проверить справедливость полученного в работе [6] выражения для компонент вектора  $\vec{s}$  не представляется возможным.

Определим компоненты вектора  $\vec{s}$  для дифракционного излучения, повторяя шаг за шагом предыдущий вывод. Для начала рассмотрим схему формирования дифракционного излучения в 2D (рисунок 1.5):

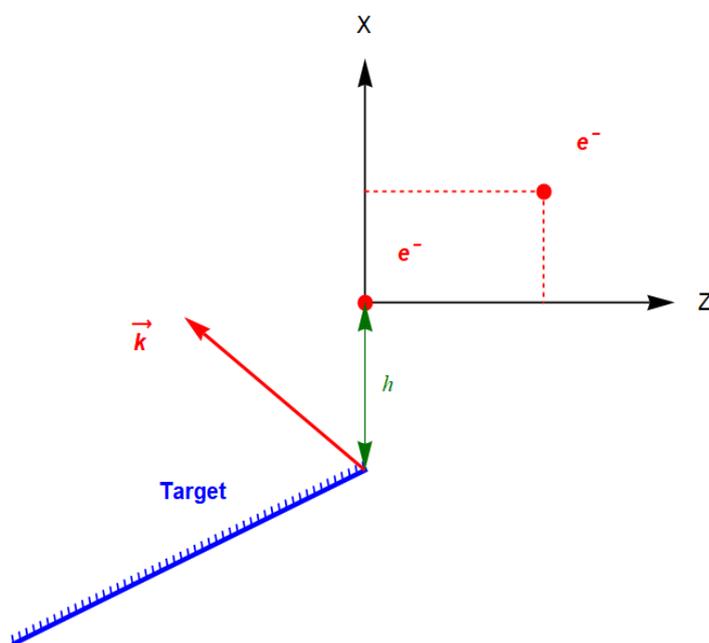


Рисунок 1.5 – Кинематика дифракционного излучения «назад» в плоскости  $xOz$

На рисунке 1.5 буквой  $h$  обозначен прицельный параметр – кратчайшее расстояние между пучком и мишенью, данный параметр необходимо принимать во внимание при расчете дифракционного излучения. Основной его

вклад в напряженность поля излучения  $\frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega}$  входит как  $e^{-\frac{2\pi h}{\gamma\lambda}}$  [6].

В дифракционном излучении, как и в переходном, источником излучения являются токи в мишени, индуцированные пролетающими релятивистскими электронами, фаза излучения в таком случае определяется моментом пролёта электрона относительно некоторой характерной точки мишени, а разность фаз

временной задержкой  $\Delta t$  между пролетом первой и второй частицы над характерной точкой мишени.

$$\omega \left( \frac{\vec{s} \cdot \vec{r}}{c} \right) = \omega \cdot \Delta t, \quad \Delta t = \frac{z}{\beta c}.$$

В таком случае, компоненты вектора  $\vec{s}$  для дифракционного излучения в представленной геометрии будут иметь более простой вид, нежели для переходного, из-за отсутствия влияния на формирование разности фаз поперечных координат пролетающих частиц:

$$\vec{s} = \begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/\beta \end{Bmatrix}.$$

Искомый вид форм-фактора можно определить, подставляя вектор  $\vec{s}$  для конкретного случая в исходную формулу.

### 1.2.2 Форм-фактор для одного сгустка

Перейдем непосредственно к определению общего вида форм-фактора для различных конфигураций электронных сгустков в пространстве.

Для определённости расчётов форм-фактора, а также для возможности аналитического решения, будем описывать нормированное пространственное распределение электронов в сгустке тремя независимыми гауссианами по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в случае и переходного и дифракционного излучений:

$$\rho(\vec{r}) = \rho(x, y, z) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right],$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – характерные размеры сгустка по оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , соответственно (см. рисунок 1.6).

Такое условие следует рассматривать как приближение ввиду того, что на распределение электронов в сгустке наложено ограничение, связанное с сохранением фазового объёма при преобразовании пучка в квадрупольных линзах и других магнитных системах [6].

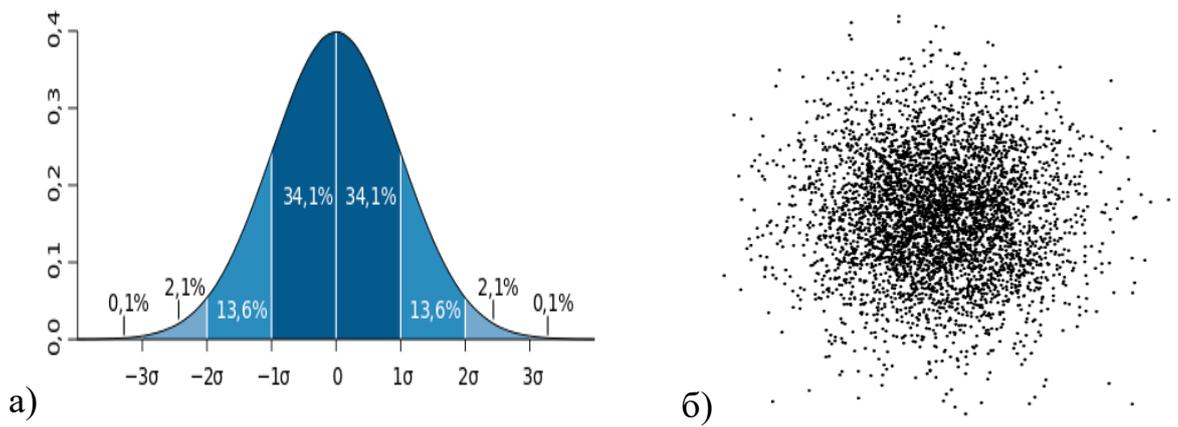


Рисунок 1.6 – График плотности вероятности нормального распределения (а), вид гауссова распределения электронов в сгустке в 2D (б)

В дифракционном излучении данное приближение выполняется, если в геометрии, приведённой на рисунке 1.5:

$$\sigma_x \ll \frac{\gamma\lambda}{2\pi} e^{\frac{2\pi h}{\gamma\lambda}} \text{ [6].}$$

Таким образом, зная аналитическое выражение распределения электронов в сгустке и зная вид разности фаз для случая переходного и дифракционного излучений, перейдем к расчету форм-фактора одного электронного сгустка. Схема эксперимента представлена на рисунке 1.7.

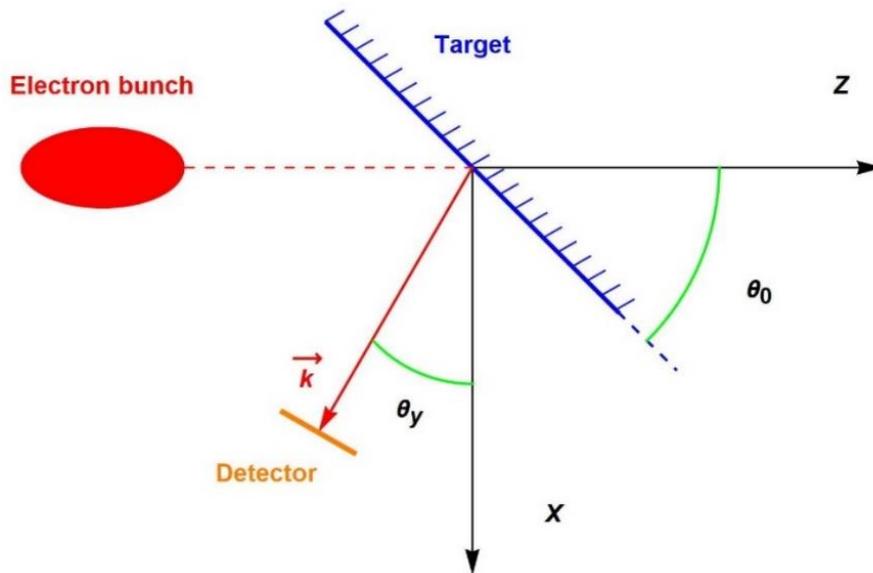


Рисунок 1.7 – Схема эксперимента с одним электронным сгустком

Запишем выражение для форм-фактора:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \iiint \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \exp \left[ i \frac{\omega}{c} (x \cdot s_x + y \cdot s_y + z \cdot s_z) \right] dx dy dz \right|^2.$$

Разобьем данное выражение на произведение трех независимых интегралов

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma_x^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x \right] dx \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} + i \frac{\omega}{c} y \cdot s_y \right] dy \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{z^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz \right\} \right|^2$$

и рассчитаем каждый из них отдельно.

Согласно таблицам интегралов от экспоненциальных функций [10]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-(ax^2 + 2bx + c)] dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left[\frac{b^2 - ac}{a}\right].$$

Для интеграла  $\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma_x^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x\right] dx$ :

$$a = \frac{1}{2\sigma_x^2}, \quad b = -i \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} s_x, \quad c = 0.$$

Тогда

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma_x^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x\right] dx = \sigma_x \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_x^2 s_x^2\right].$$

Аналогично

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} + i \frac{\omega}{c} y \cdot s_y\right] dy = \sigma_y \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_y^2 s_y^2\right],$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{z^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z\right] dz = \sigma_z \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_z^2 s_z^2\right].$$

Подставим полученные значения в выражение для форм-фактора:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left\{ \sigma_x \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_x^2 s_x^2\right] \right\} \left\{ \sigma_y \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_y^2 s_y^2\right] \right\} \left\{ \sigma_z \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_z^2 s_z^2\right] \right\} \right|^2,$$

и проведя алгебраические преобразования, получим выражение форм-фактора для одного сгустка:

$$F(\omega, \vec{s}) = \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_x^2 s_x^2 + \sigma_y^2 s_y^2 + \sigma_z^2 s_z^2) \right].$$

Полученная формула справедлива как для переходного, так и для дифракционного излучения, её конечный вид будет определяться вектором  $\vec{s}$ . К примеру, для дифракционного излучения:

$$\begin{aligned} F(\omega, \vec{s}) &= \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} \left( \sigma_x^2 \cdot (0)^2 + \sigma_y^2 (0)^2 + \sigma_z^2 \left( \frac{1}{\beta} \right)^2 \right) \right] = \\ &= \exp \left[ -\frac{\omega^2 \sigma_z^2}{c^2} \left( \frac{1}{\beta} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

И для переходного:

$$F(\omega, \vec{s}) = \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} \left( \sigma_x^2 \cdot \left( -\cos \theta_y \cos \theta_x - \cot \theta_0 \left( \sin \theta_y - \frac{1}{\beta} \right) \right)^2 + \sigma_y^2 (-\cos \theta_y \sin \theta_x)^2 + \sigma_z^2 \left( -\frac{1}{\beta} \right)^2 \right) \right].$$

Следующие выводы форм-фактора не будут сопровождаться подстановкой конкретных компонент вектора  $\vec{s}$ , то есть, будут записаны в общем виде (для представленных геометрий экспериментов и гауссова распределения электронов в сгустке) для компактности записи получаемых выражений.

### 1.2.3 Форм-фактор для равномерной последовательности сгустков

Рассмотрим последовательность из  $m$  одинаковых электронных сгустков, удаленных друг от друга на одинаковое расстояние  $l$ , с равномерно распределенным пространственным зарядом, полагая, что центр первого сгустка находится в начале системы координат связанной с мишенью, и отсчет сгустков ведется против направления скорости сгустков, т.е. против направления оси Z (рисунок 1.8).

Нормированное пространственное распределение электронов последовательности сгустков в приведенной на рисунок 1.8 геометрии будет иметь вид:

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{m(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \sum_{p=1}^m \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z + l \cdot (p-1))^2}{\sigma_z^2} \right].$$

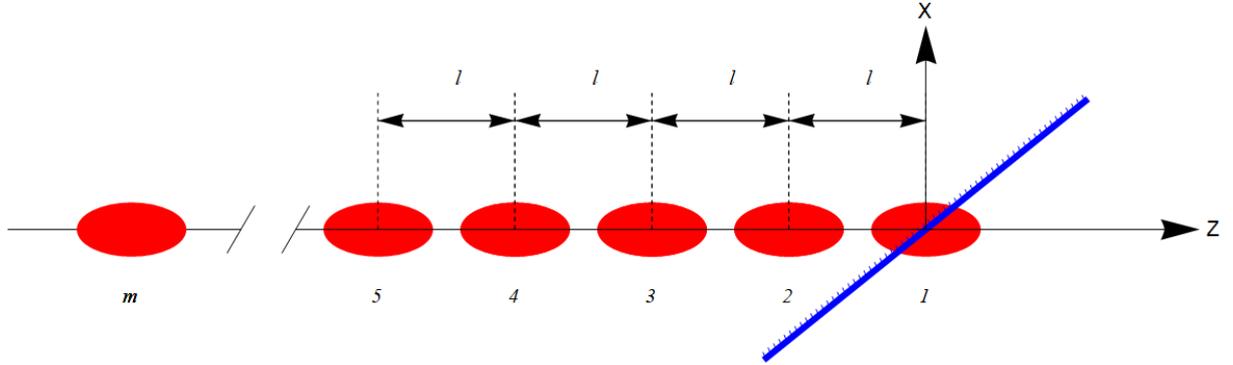


Рисунок 1.8 – Схема равномерной последовательности электронных сгустков

Запишем форм-фактор такой последовательности:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \frac{1}{m(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma_x^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x \right] dx \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} + i \frac{\omega}{c} y \cdot s_y \right] dy \right\} \left\{ \sum_{p=1}^m \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z + l \cdot (p-1))^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz \right\} \right|^2.$$

Решение для первых двух интегралов было разобрано в предыдущей части главы, потому остановимся подробнее на решении только третьего интеграла.

Интеграл от суммы можно рассматривать как сумму интегралов

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{p=1}^m \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z + l \cdot (p-1))^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz = \sum_{p=1}^m \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -\left( \frac{1}{2\sigma_z^2} z^2 + 2 \left( \frac{l \cdot (p-1)}{2\sigma_z^2} - i \frac{\omega}{2c} s_z \right) z + \frac{l^2 \cdot (p-1)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] dz,$$

а коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$ , в данном случае имеют следующий вид:

$$a = \frac{1}{2\sigma_x^2}, \quad b = \frac{l \cdot (p-1)}{2\sigma_z^2} - i \frac{\omega}{2c} s_z, \quad c = \frac{l^2 \cdot (p-1)^2}{2\sigma_z^2}.$$

С учетом вышесказанного, запишем решение для третьего интеграла

$$\sum_{p=1}^m \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -\left( \frac{1}{2\sigma_z^2} z^2 + 2 \left( \frac{l \cdot (p-1)}{2\sigma_z^2} - i \frac{\omega}{2c} s_z \right) z + \frac{l^2 \cdot (p-1)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] dz = \sigma_z \sqrt{2\pi} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_z^2 s_z^2 \right] \sum_{p=1}^m \exp \left[ -i \frac{\omega}{c} l \cdot (p-1) s_z \right],$$

и форм-фактора:

$$F(\omega, \vec{s}) = \frac{1}{m^2} \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_x^2 s_x^2 + \sigma_y^2 s_y^2 + \sigma_z^2 s_z^2) \right] \left| \sum_{p=1}^m \exp \left[ -i \frac{\omega}{c} l \cdot (p-1) s_z \right] \right|^2.$$

### 1.2.4 Учет пространственного распределения заряда

Введем параметр, учитывающий распределение пространственного заряда в последовательности сгустков:

$$\mu_p = \frac{N_p}{\sum_{p=1}^m N_p}.$$

Данный параметр характеризует долю пространственного заряда в  $p$ -ом сгустке и является нормированной величиной:

$$\sum_{p=1}^m \mu_p = \sum_{p=1}^m \frac{N_p}{\sum_{p=1}^m N_p} = 1.$$

Выражение для нормированного пространственного распределения электронов последовательности из  $m$  одинаковых сгустков с одинаковым расстоянием  $l$  между ними, в геометрии, представленной на рисунке 1.9

при учете параметра  $\mu_p$ , выглядит следующим образом:

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \sum_{p=1}^m \mu_p \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z + l \cdot (p-1))^2}{\sigma_z^2}\right].$$

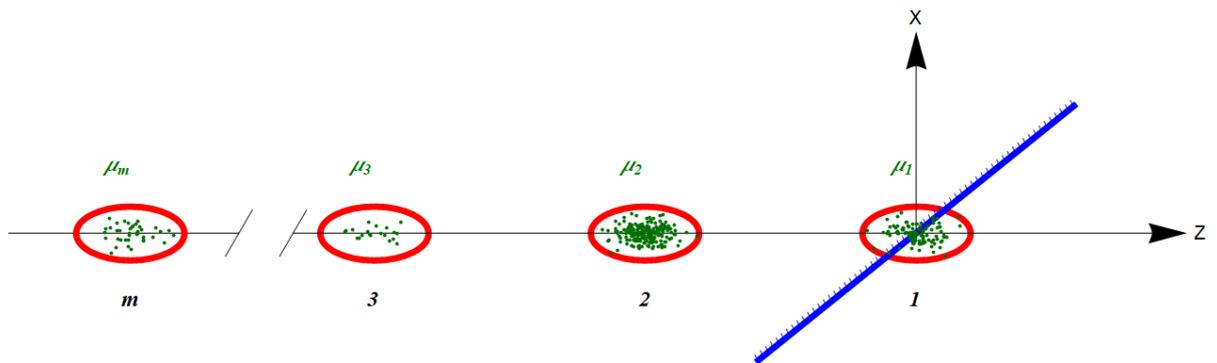


Рисунок 1.9 – Схема последовательности электронных сгустков с неравномерным распределением заряда в пучке

Нетрудно убедиться, что при равномерном распределении заряда, когда  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_p$ , пространственное распределение электронов принимает вид идентичный виду распределения из предыдущей части главы.

Рассчитаем форм-фактор подобного распределения сгустков:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left[ \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma_x^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x \right] dx \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} + i \frac{\omega}{c} y \cdot s_y \right] dy \right\} \left\{ \int \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z+l \cdot (p-1))^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz \right\} \right]^2.$$

Дальнейший ход рассуждений аналогичен представленному в предыдущей части главы, с тем лишь исключением, что мы выносим коэффициент  $\mu_p$  за знак интеграла, как постоянный множитель:

$$\int \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z+l \cdot (p-1))^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz = \sum_{p=1}^m \mu_p \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -\left( \frac{1}{2\sigma_z^2} z^2 + 2 \left( \frac{l \cdot (p-1)}{2\sigma_z^2} - i \frac{\omega}{2c} s_z \right) z + \frac{l^2 \cdot (p-1)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] dz.$$

Тогда, форм-фактор, с учетом распределения пространственного заряда в последовательности одинаковых (с точки зрения характерных размеров  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\sigma_z$ ) сгустков, удаленных друг от друга на одинаковое расстояние будет иметь следующий вид:

$$F(\omega, \vec{s}) = \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_x^2 s_x^2 + \sigma_y^2 s_y^2 + \sigma_z^2 s_z^2) \right] \left[ \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -i \frac{\omega}{c} l \cdot (p-1) s_z \right] \right]^2.$$

### 1.2.5 Учет произвольного расстояния между сгустками

Рассмотрим все ту же последовательность электронных сгустков с произвольным пространственным зарядом, одинаковыми размерами, но с разным расстоянием между ними (рисунок 1.10).

Распределение для такого случая запишем как:

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z - z_p)^2}{\sigma_z^2} \right],$$

где  $z_p$  - координата центра  $p$ -ого сгустка, отсчитываемая от начала системы координат, связанной с мишенью.

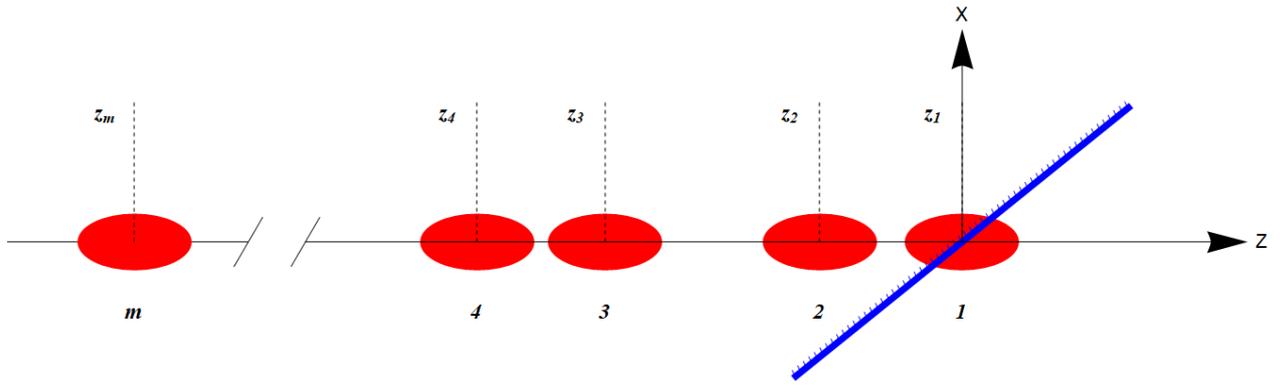


Рисунок 1.10 – Схема последовательности электронных сгустков с заданным продольным смещением

Рассчитаем форм-фактор, как это было показано в предыдущих частях:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma_x^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x \right] dx \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} + i \frac{\omega}{c} y \cdot s_y \right] dy \right\} \left\{ \int \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z-z_p)^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz \right\} \right|^2.$$

И уже традиционно будем рассматривать только третий интеграл:

$$\int \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z-z_p)^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz = \sum_{p=1}^m \mu_p \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -\left( \frac{1}{2\sigma_z^2} z^2 + 2 \left( -\frac{z_p}{2\sigma_z^2} - i \frac{\omega}{2c} s_z \right) z + \frac{z_p^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] dz.$$

Выделим коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$ :

$$a = \frac{1}{2\sigma_z^2}, \quad b = -\frac{z_p}{2\sigma_z^2} - i \frac{\omega}{2c} s_z, \quad c = \frac{z_p^2}{2\sigma_z^2},$$

и запишем решение для данного интеграла:

$$\sum_{p=1}^m \mu_p \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -\left( \frac{1}{2\sigma_z^2} z^2 + 2 \left( -\frac{z_p}{2\sigma_z^2} - i \frac{\omega}{2c} s_z \right) z + \frac{z_p^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] dz = \sigma_z \sqrt{2\pi} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \sigma_z^2 s_z^2 \right] \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ i \frac{\omega}{c} z_p s_z \right],$$

и форм-фактора:

$$F(\omega, \vec{s}) = \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_x^2 s_x^2 + \sigma_y^2 s_y^2 + \sigma_z^2 s_z^2) \right] \left| \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ i \frac{\omega}{c} z_p s_z \right] \right|^2.$$

### 1.2.6 Учет поперечного смещения сгустков в последовательности

Поперечное смещение сгустков так же можно описать через пространственное распределение, введя дополнительные параметры  $x_p$  и  $y_p$ , представляющие из себя координаты центра  $p$ -ого сгустка по соответствующим осям  $X$  и  $Y$  (рисунок 1.11):

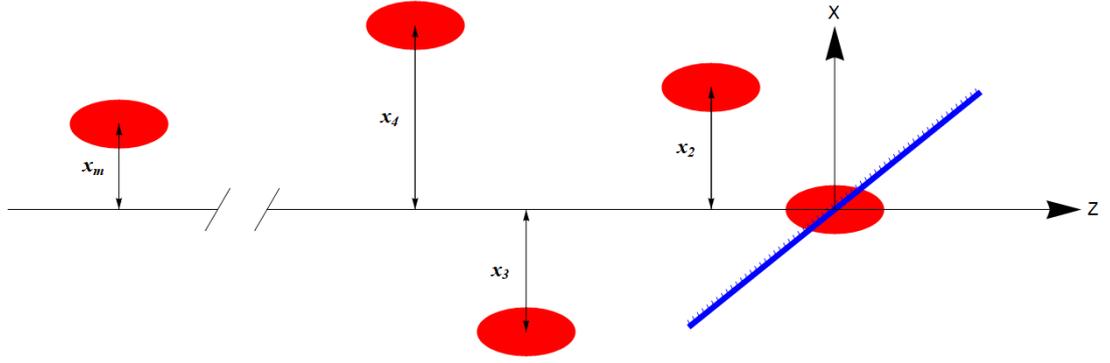


Рисунок 1.11 – Схема последовательности электронных сгустков с поперечными смещениями

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{(x - x_p)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - y_p)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z - z_p)^2}{\sigma_z^2} \right\} \right].$$

Рассчитаем форм-фактор для этого случая:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \sum_{p=1}^m \mu_p \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(x - x_p)^2}{\sigma_x^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x \right] dy \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(y - y_p)^2}{\sigma_y^2} + i \frac{\omega}{c} y \cdot s_y \right] dz \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z - z_p)^2}{\sigma_z^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dz \right\} \right|^2.$$

Поскольку интеграл подобный представленным уже рассматривался выше, опустим расчёты и сразу представим получившееся выражение:

$$F(\omega, \vec{s}) = \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_x^2 s_x^2 + \sigma_y^2 s_y^2 + \sigma_z^2 s_z^2) \right] \left| \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ i \frac{\omega}{c} (x_p s_x + y_p s_y + z_p s_z) \right] \right|^2.$$

### 1.2.7 Учет произвольности размеров сгустков в последовательности

Перейдем к последовательности, в которой сгустки помимо вышеописанных произвольных параметров так же имеют размеры, меняющиеся от сгустка к сгустку (рисунок 1.12).

Стоит понимать, что характерный размер обозначен на схеме условно, и реальный размер сгустка находится через соотношения, представленные на рисунке 1.6а.

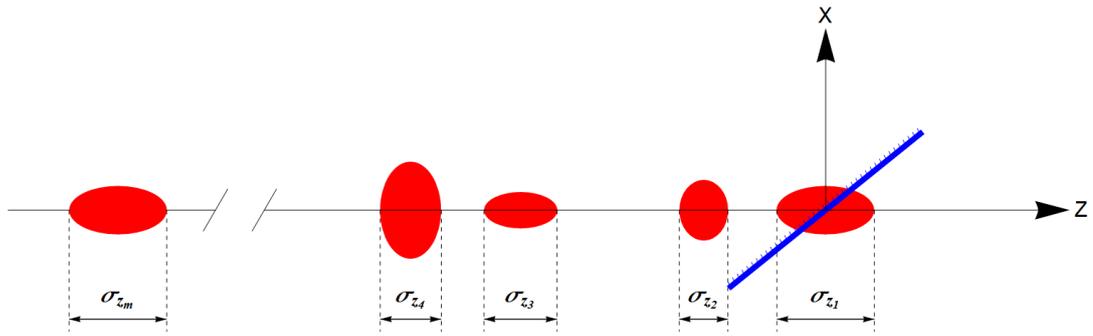


Рисунок 1.12 – Схема последовательности электронных сгустков с разными продольными и поперечными размерами

Параметр изменчивости размеров можно учесть с помощью выражения для нормированного пространственного распределения электронов в последовательности сгустков:

$$\rho(x, y, z) = \sum_{p=1}^m \mu_p \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{x_p} \sigma_{y_p} \sigma_{z_p}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{(x-x_p)^2}{\sigma_{x_p}^2} + \frac{(y-y_p)^2}{\sigma_{y_p}^2} + \frac{(z-z_p)^2}{\sigma_{z_p}^2} \right\} \right].$$

Запишем форм-фактор:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left[ \sum_{p=1}^m \mu_p \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{x_p} \sigma_{y_p} \sigma_{z_p}} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(x-x_p)^2}{\sigma_{x_p}^2} + i \frac{\omega}{c} x \cdot s_x \right] dy \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(y-y_p)^2}{\sigma_{y_p}^2} + i \frac{\omega}{c} y \cdot s_y \right] dz \right\} \left\{ \int \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(z-z_p)^2}{\sigma_{z_p}^2} + i \frac{\omega}{c} z \cdot s_z \right] dx \right\} \right]^2.$$

Опустим расчеты, поскольку они будут повторять предыдущие выводы, и сразу запишем итоговое выражение для форм-фактора

$$F(\omega, \vec{s}) = \left[ \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_{x_p}^2 s_x^2 + \sigma_{y_p}^2 s_y^2 + \sigma_{z_p}^2 s_z^2) \right] \exp \left[ i \frac{\omega}{c} (x_p s_x + y_p s_y + z_p s_z) \right] \right]^2.$$

### 1.2.8 Приближения, допущения и ограничения подхода

Переходя к следующей части главы, стоит обозначить все «белые пятна» работы, предвосхищая возникновение вопросов у придирчивого читателя. Здесь будут приведены как новые, так и уже упоминавшиеся ранее приближения и ограничения.

1. Распределение электронов в сгустке задается тремя независимыми непрерывными распределениями по трем осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

2. Напряженность поля отдельно взятого электрона не зависит от изменения его положения в сгустке.
3. Предполагается, что количество электронов в сгустке много больше единицы.
4. В расчётах когерентной и некогерентной составляющих формулы спектрально-углового распределения учитываются комбинации взаимодействия двух частиц, однако, не учтены комбинации взаимодействия трёх и более частиц.
5. Полученные формулы, учитывающие различные параметров последовательностей справедливы только для Гауссова распределения частиц в сгустках.
6. Предполагается, что мишень имеет бесконечные размеры и сделана из материала с бесконечной проводимостью, то есть, является идеальным проводником.
7. Не учтён некогерентный форм-фактор [11] в формуле для полного спектрально-углового распределения излучения.
8. Не учтено влияние кулоновского расталкивания заряженных частиц в пучке.
9. Не учтены более сложные геометрические параметры, такие как наклон каждого сгустка в пространстве, и поворот мишени вокруг двух осей (в представленной работе мишень может быть наклонена только относительно одной оси).
10. Как правило, процессы переходного и дифракционного излучения протекают одновременно. Так, например, заряженная частица, перед непосредственным столкновением с мишенью (в случае переходного излучения) сначала “соприкасается” с мишенью своим полем, вызывая тем самым генерацию дифракционного излучения. Данная работа не учитывает наложение этих эффектов друг на друга, а рассматривает только отдельные, “чистые” случаи, что является не совсем верным, когда нужно рассчитать реальный эксперимент.

Говоря об ограничениях, стоит подчеркнуть, что многие из этих пробелов не являются неразрешимыми, и еще не учтены скорее из-за нехватки времени на работу. Все что может быть исправлено, в конце концов, будет исправлено.

### **1.3 Программы для расчёта форм-фактора аналитическим методом**

После рассмотрения теории расчета форм-фактора и получения формул для неравномерных последовательностей сгустков стоит вопрос автоматизации вычислений по этим формулам. Появляется новая задача - создание программных инструментов, обладающих высокой (по сравнению с человеческими возможностями) скоростью расчета и построения графиков, имеющих обширный функционал и одновременно с тем простой и понятный интерфейс для человека, не владеющего навыками программирования. Кроме того, программы должны иметь качественную трехмерную визуализацию последовательности сгустков и геометрий эксперимента, поскольку полученные формулы изобилуют множеством пространственных параметров.

Решение задачи осуществлено в пакете Wolfram Mathematica. В ходе работы создан ряд специальных приложений, отвечающих заявленным требованиям (листинг представлен в приложении Б). Каждое следующее приложение является усовершенствованной версией предыдущего, поэтому все они имеют схожую структуру и интерфейс. Приложения развивались и дополнялись новыми параметрами с усложнением самой формулы форм-фактора. Тем не менее, каждое из приложений является законченным инструментом и может быть использовано для расчета форм-фактора от соответствующих конфигураций электронных сгустков в пучке. Опишем функционал последней версии приложения. На рисунке 1.13 ниже показан интерфейс программы.

Динамически задавая параметры, можно получить на выходе график форм-фактора, в зависимости от длины или частоты волны, на усмотрение пользователя. Выбор осуществляется параметром «Переключатель графиков». Под графиком приведена схема движения пучка, где отражается его вид и геометрия эксперимента. Зеленым обозначена мишень, желтым детектор, а

красным сгустки. Отображение сгустков можно менять с непрерывного, когда они изображены в виде эллипсоидов, на дискретное, когда они изображены набором точек. Эта функция заложена в параметр «Переключатель схемы».

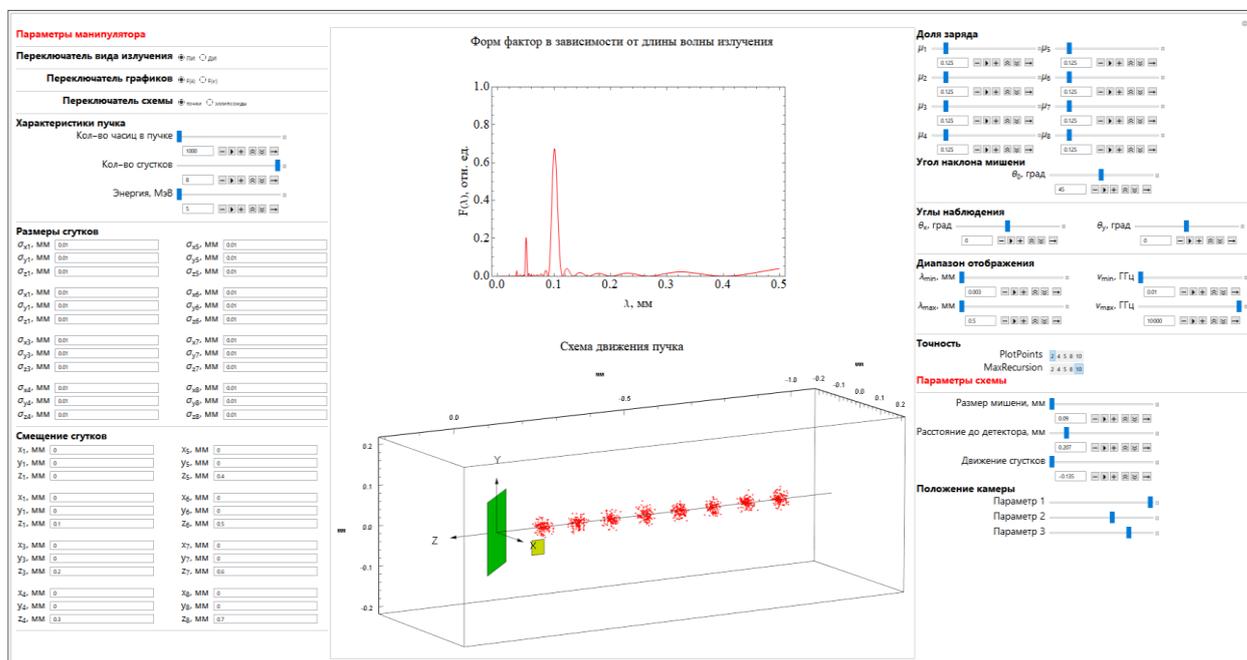


Рисунок 1.13 – Интерфейс программы для расчета форм-фактора аналитическим методом

Также можно менять тип исследуемого излучения (на данный момент, доступны переходное и дифракционное излучение). Функция реализована через «Переключатель вида излучения». Далее следуют характеристики пучка: «Количество частиц в пучке» (параметр работает только в случае выбора дискретного отображения электронов в сгустках на схеме), «Количество сгустков» и «Энергия». Количество сгустков ограничено восемью, тем не менее, гибкость кода позволяет добавить еще в случае необходимости. До настоящего момента этого было достаточно. Параметр энергии электронов варьируется от 1 до 1000 МэВ, и отображается на схеме постепенным изменением цвета сгустков от красного к синему. Далее в колонках «Размеры сгустков» можно задать размер каждого сгустка через характерные размеры  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , а в колонках «Смещение сгустков» определить положение центров каждого сгустка в представленной на схеме геометрии. Оба параметра задаются в мм. «Доля заряда» определяет сколько электронов от общего количества

будет находиться в том или ином сгустке. «Угол наклона мишени» и «Углы наблюдения» определяют поворот мишени вокруг оси  $Y$ , и положение детектора, соответственно. Параметры задаются в градусах. «Диапазон отображения» позволяет масштабировать получившийся график, как в случае зависимости от длины волны излучения, так и в случае зависимости от его частоты. Регулируя параметры в разделе «Точность», можно добиться оптимального соотношения скорости вычисления и точности отображения графика форм-фактора. Параметры схемы «Размер мишени» и «Расстояние до детектора» не влияют на график и необходимы только для правильного масштабирования схемы и её отображения. «Движение сгустков» позволяет рассмотреть динамику пучка, и при пересечении центра первого сгустка мишени, наблюдать схематичный конус излучения, направление которого задано с учетом теории переходного излучения, что может быть полезно при определении правильного (с точки зрения абстрактного эксперимента) положения детектора. Положение камеры (наблюдателя) определяется тремя параметрами, и на данный момент нуждается в доработке, поскольку при динамической смене одного из условий эксперимента, отображение схемы «пляшет» в разные стороны.

#### 1.4 Вычисление форм-фактора численным методом

После прохождения сгустка в магнитных системах, его конфигурация может измениться таким образом, что становится невозможно или достаточно затруднительно описать распределение электронов в сгустке или последовательности сгустков аналитической формулой, однако, выразить форм-фактор все же необходимо.

Представим алгоритм расчета форм-фактора, для такого случая. Вернемся к формулам для полного спектрально-углового распределения частиц в сгустке до выполнения математических преобразований:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^N e^{i\frac{\omega \cdot \vec{s}}{c}(\vec{r}_j - \vec{r}_p)},$$

и после:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \left[ N + N(N-1)F(\omega, \vec{s}) \right] \cdot \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega}.$$

Приравняем правые части:

$$N + N(N-1)F(\omega, \vec{s}) = \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^N e^{i\frac{\omega \cdot \vec{s}}{c}(\vec{r}_j - \vec{r}_p)}.$$

И выразим форм-фактор:

$$F(\omega, \vec{s}) = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^N \exp\left[i\frac{\omega \cdot \vec{s}}{c}(\vec{r}_j - \vec{r}_p)\right] - N}{N(N-1)}.$$

Расчет форм-фактора “вручную” в данном случае не представляется возможным, поскольку, помимо того, что количество электронов только в одном сгустке может достигать миллиардных значений, необходимо также знать координату каждого электрона в сгустке. Тем не менее, если мы говорим о моделях электронных сгустков, получить список координат каждого электрона не составит большого труда. Так, например, с помощью кода ASTRA [12] можно получить пространственные распределения электронов максимально приближенным к реальным (рисунок 1.14).

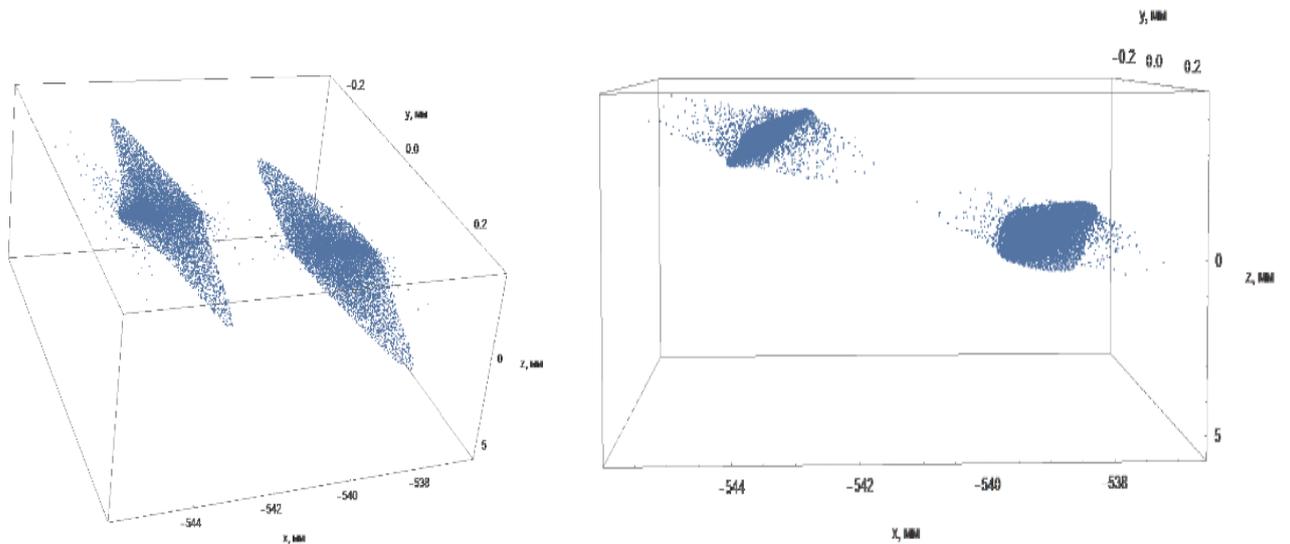


Рисунок 1.14 – Модель электронных сгустков после прохождения системы магнитных линз, сгенерированная с помощью кода ASTRA

Проблема обработки больших массивов данных, также решается использованием вычислительных способностей современных компьютеров. Таким образом, для численного расчета форм-фактора данным способом необходимо иметь список координат каждого электрона в сгустке, задать компоненты вектора  $\vec{s}$ , и автоматизировать расчет. То есть, определить тип излучения, и создать специальную программу для вычислительной машины (персонального компьютера). В приложении В представлен листинг кода, написанного на базе вышеописанного подхода. Код реализован в пакете Wolfram Mathematica.

Для проверки метода и кода было проведено сравнение результатов моделирования форм-фактора предложенным численным и аналитическим подходами. Случайным образом сгенерированы 2 набора координат точек, представляющих из себя один (рисунок. 1.15а) и два гауссовых сгустка (рисунок 1.15б) с одинаковыми поперечными и продольными размерами. Каждый сгусток состоял из 1000 частиц.

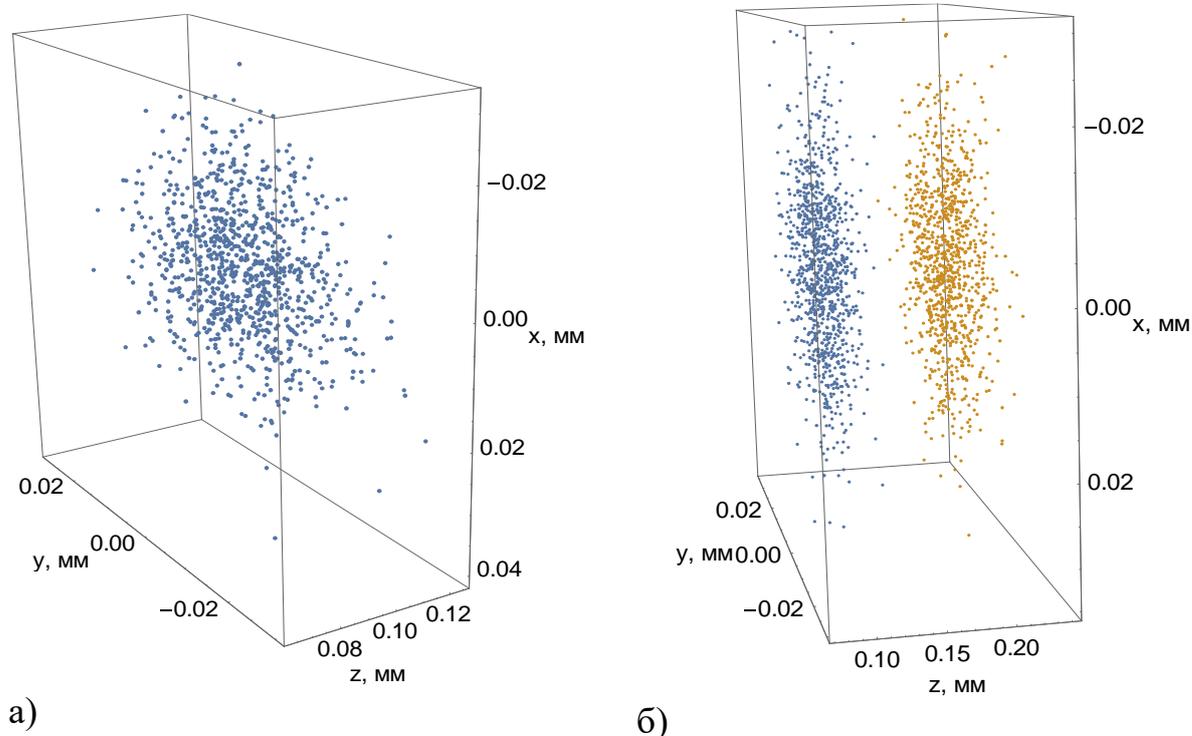


Рисунок 1.15 – Вид одного сгенерированного электронного сгустка (а), вид двух сгенерированных электронных сгустков (б)

На рисунке 1.16 приведено сравнение форм-факторов, рассчитанных на основе вышеописанных подходов, для электронов с энергией 10 МэВ. Расстояние между двумя сгустками обозначено буквой  $L$ .

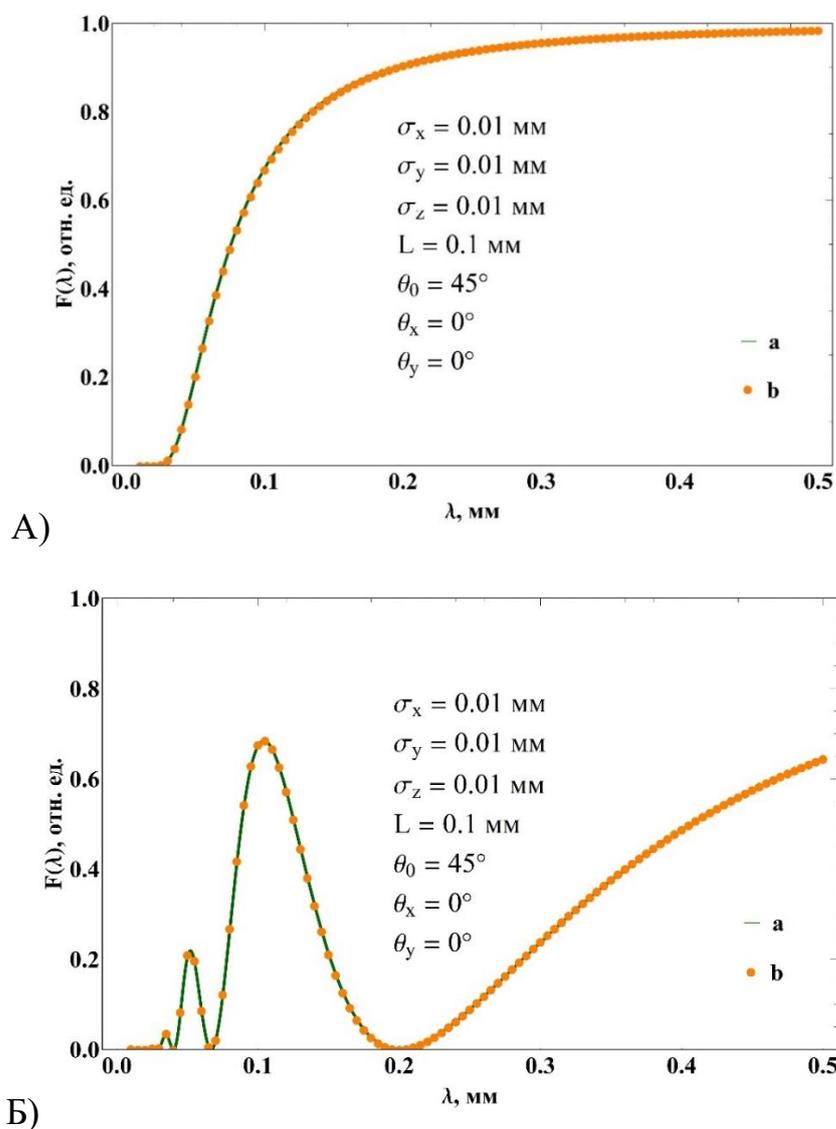
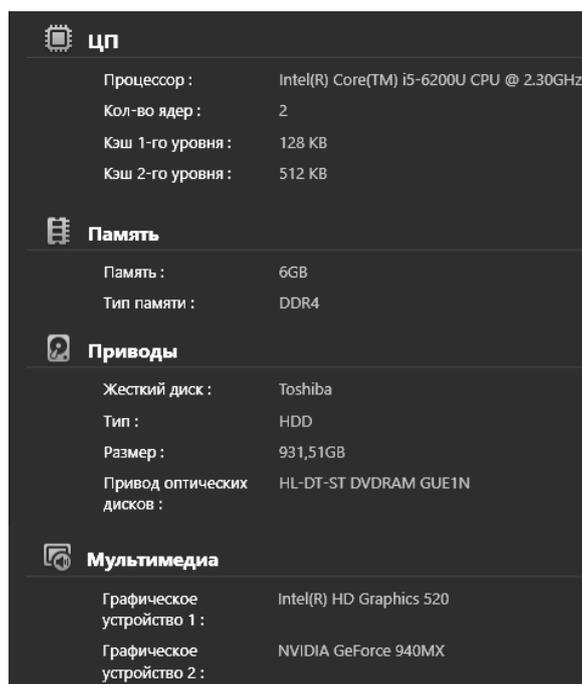
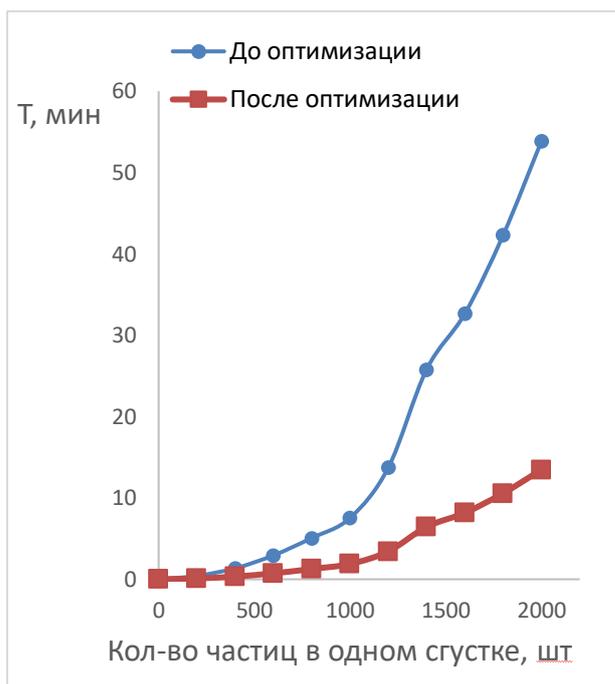


Рисунок 1.16 – Сравнение аналитического (а) и численного (б) подходов для случая одного (А) и двух электронных сгустков (Б)

Видно хорошее согласие двух подходов для случая 1-го и 2-х сгустков. В приведённом диапазоне длин волн разность значений в основном  $<2\%$ , кроме интервалов, соответствующих минимумам форм-фактора. Это связано с расчётами малых значений на пределе машинной точности. Заметим, что сравнение проведено для конкретных значений угла наблюдения и угла наклона мишени.

Данный способ, тем не менее, имеет существенный недостаток – резкое увеличение времени расчёта с ростом числа частиц (рисунок 1.17а).



а)

б)

Рисунок 1.17 – Зависимость времени расчетов форм-фактора от количества частиц (а), конфигурация программного обеспечения ноутбука Acer TravelMate P259-MG [13] на котором производился расчет (б)

Первоначально расчёт форм-фактора реальных сгустков ( $\sim 10^8/10^{10}$  частиц) на компьютере средней производительности требовал колоссального количества времени. На рисунке 1.17а приведена зависимость времени расчётов на ноутбуке Acer TravelMate P259-MG (конфигурация аппаратного обеспечения представлена на рисунке 1.17б) от количества частиц в последовательности сгустков до оптимизации кода. Было принята попытка оптимизации кода, в результате которой удалось сократить время расчетов в четыре раза. Ниже представлена таблица сравнения двух методов моделирования.

Таблица 1.1 – Сравнение методов

	Аналитический метод	Численный метод
Плюсы	<ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая скорость расчета</li> <li>Точность построения спектра</li> </ul>	Позволяет рассчитать форм-фактор последовательностей сгустков любых конфигураций
Минусы	Только для распределений, выражающихся аналитически	<ul style="list-style-type: none"> <li>Необходим список всех координат электронов пучка</li> <li>Низкая скорость расчета</li> </ul>

Необходимо продолжить предпринимать попытки оптимизировать представленный код, поскольку как уже говорилось, количество частиц в сгустках может достигать миллиардных значений и соответственно, расчет форм-фактора от подобных пучков представленным методом будет занимать слишком много времени.

### **1.5 Выводы по разделу**

Таким образом, был приведен подробный вывод формулы полного спектрально-углового распределения излучения и форм-фактора для случая переходного и дифракционного излучений от неравномерных последовательностей электронных сгустков. Тщательно рассчитаны компоненты вектора  $\vec{s}$ , отвечающего за формирование разности фаз для случая переходного и дифракционного излучения в заданной геометрии, определение которых вызывает, как правило, некоторые затруднения, связанные с работой в трехмерном пространстве. В выражение для форм-фактора были введены новые параметры, учитывающие: распределения заряда в последовательности сгустков, поперечное смещение и произвольный размер для каждого сгустка в последовательности. Также приведены ограничения и допущения подхода.

На основе представленных формул создано приложение-манипулятор, позволяющий динамически задавая параметры последовательности электронных сгустков и условий эксперимента, получать на выходе спектр переходного/дифракционного излучения в зависимости от длины или частоты выходного излучения, что будет использовано в следующей главе для построения спектров излучения от реальных последовательностей электронных сгустков и анализа зависимости характеристик излучения от параметров последовательностей сгустков.

Помимо этого, предложен новый прямой метод расчета форм-фактора, базирующийся на принципах численного моделирования, для случаев, когда распределения электронов в сгустке невозможно или затруднительно выразить аналитически. Для реализации метода так же написан, а затем и оптимизирован специальный код. Верификация кода проводилась путем сравнения результатов

моделирования форм-фактора предложенным методом и ранее описанным аналитическим, при одинаковых заданных условиях эксперимента. Результат сравнения показал хорошее совпадение двух подходов.

В будущем планируется дополнить аналитическое выражение для форм-фактора параметром наклона каждого сгустка в пространстве и поворотом мишени относительно второй оси. Рассчитать фазу излучения, то есть вектор  $\vec{s}$  для случая всех поляризационных видов излучений и задать эти параметры в созданное приложение-манипулятор, расширив, таким образом, функционал приложения, который пока ограничивается только переходным и дифракционным излучениями. Объединить код для численного метода с приложением, для большего удобства расчетов и провести его повторную оптимизацию. Необходимо обратить внимание на влияние некогерентного форм-фактора на характер излучения и также внести этот параметр в теорию, учесть наложение переходного и дифракционного излучения друг на друга и влияние этого наложения на выходной спектр, учесть влияние кулоновского расталкивания частиц и в дальнейшем, переходить к рассмотрению динамических процессов.

## **2. Моделирование и анализ спектров излучения**

Данная глава ставит целью показать какими характеристиками будут обладать спектры переходного излучения от уже существующих последовательностей фемто- и аттосекундных электронных сгустков и выделить закономерности влияния параметров электронного пучка на характер излучения, оперируя теорией и инструментами, представленными в главе 1.

В главе приводятся краткий обзор методов генерации последовательностей коротких электронных сгустков, параметры реальных последовательностей электронных сгустков и результаты моделирования спектров излучения от этих последовательностей, представлен анализ влияния параметров электронного пучка на итоговый вид спектра излучения с рекомендациями к модификации последовательностей сгустков таким образом, чтобы получить высокоинтенсивное монохроматическое излучение.

### **2.1 Краткий обзор методов генерации последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительности**

Есть множество способов уменьшить длительность лазерного импульса в лазерах на свободных электронах. Один из таких способов, например, заключается в уменьшении заряда электронного пучка, то есть, чем меньше в пучке электронов, тем он короче, что приводит к тому, что лазерный импульс тоже оказывается очень коротким. В качестве альтернативы, можно использовать, так называемую, фольгу с прорезями, проходя через которую поперечный эмиттанс электронного пучка разрезается на множество узких полос, проходящих через эти прорези, которые затем поворачиваются в магнитных системах. Вместо фольги с прорезями, можно также использовать серию очень коротких оптических лазерных импульсов для реализации фотоэмиссии на поверхности металлов и полупроводников [14]. Задержка между импульсами будет характеризовать расстояние между сгустками, а продолжительность импульса – их длину. Современные схемы сжатия электронных сгустков достаточно сложны и включают разнообразные методики с использованием электростатических элементов, изменяющихся во

времени электромагнитных полей внутри радиочастотных полостей, электромагнитных переходных процессов и комбинаций оптических лазерных импульсов и диэлектрических мембран [15]. В общем, если подходить к этому вопросу более глубоко, понадобится еще одна квалификационная работа, потому мы не будем подробно описывать способы генерации рассматриваемых в данной работе последовательностей электронных сгустков, а сосредоточимся непосредственно на их характеристиках.

## **2.2 Характеристики электронных пучков**

В этой части главы приведём описание последовательностей электронных сгустков, найденных в 10 статьях [14-23] последних двух десятилетий. Самая ранняя статья в нашем списке датируется 2008 годом, самая свежая – 2019.

Поиск статей осуществлялся преимущественно через Google-поиск [24], и интернет ресурс Sci-Hub [25], по ключевым словам, “electron bunch train”, “femtosecond/attosecond electron bunches”, “THz radiation sources”, “CTR sources”, “bunch form factor” и т.п. Первые шесть статей [14, 16-20] посвящены генерации последовательностей фемтосекундных сгустков, последние четыре [15, 21- 23] – аттосекундным. Информация о параметрах последовательностей электронных сгустков собиралась как из текстов, так и из графического материала статей, методом пропорциональных отношений в рисунках и схемах. При масштабировании и переводе значений из единиц временных промежутков в единицы измерения расстояния средняя скорость электронов в последовательности полагалось равной скорости света, то есть,  $\beta \approx 1$ , за исключением статьи [21], где средняя энергия электронов не достигает релятивистского предела, и равна 28 кэВ. Для осуществления моделирования форм-фактора, в каждой статье было необходимо найти следующие параметры последовательности: количество сгустков в последовательности, характерные размеры каждого сгустка, средняя энергия электронов в последовательности сгустков, расстояния между сгустками. К сожалению, информация о распределении заряда в последовательности была приведена только в статье [19], в остальных случаях моделирование форм-фактора осуществлялось

в предположении, что заряд распределен в последовательности равномерно. Также стоит отметить, что не во всех статьях удавалось найти параметры каждого сгустка, в таких случаях моделирование проводилось для усредненных параметров [17, 19, 21-23]. В статье [21] нет точной информации о количестве сгустков в последовательности, но приводится распределение плотности электронов для двух сгустков, таким образом, было принято решение считать, что количество сгустков равно двум, как минимально возможное значение для этого параметра. Аналогичное решение принято для статей [15, 23]. Поперечные размеры сгустков по осям  $X$  и  $Y$ , во всех статьях одинаковы и обозначены одним размером  $\sigma_t$  (от англ. transverse – поперечный), то есть,  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_t$ . Стоит отметить, что моделирование форм-фактора приводится для статичных последовательностей, и если рассматривать динамику пучка электронов, то появляется множество новых пространственных параметров, таких как угловая расходимость пучка, эмиттанс и т.д. Именно динамические последовательности рассматриваются в приведенных статьях. Часто из “динамических” параметров можно получить необходимые “статичные”, однако в некоторых случаях это вызывает затруднения, связанные с упоминавшимся ранее приближением, о том, что при движении к мишени каждый электрон в последовательности сохраняет свои поперечные координаты. Некоторые параметры последовательности были получены из характеристик самих установок, так, например, при генерации сгустков методом фотоэлектронной эмиссии, такой характеристикой мог выступать размер лазерного пятна на катоде, который с некоторым приближением можно считать поперечным размером электронного сгустка, подобным же образом можно определить расстояние между сгустками по частоте следования лазерного импульса. Поскольку в выражении для форм-фактора не учитывается наклон сгустков, мы пренебрегли этим параметром. В качестве аргумента для этого допущения скажем, что наклоны сгустков если и были, то были незначительны и составляли максимум 2-3 градуса. Также не были учтены

незначительные (относительно поперечных размеров самих сгустков) поперечные смещения сгустков в последовательности относительно друг друга. Отметим, однако, что такие допущения могут привести к неправильным выводам, если приведенные параметры будут выражены сильнее.

Ниже приведена таблица с основными усреднёнными параметрами найденных последовательностей. Более подробную таблицу с параметрами можно найти в приложении Г.

Таблица 2.1 – Параметры найденных последовательностей сгустков

№, ссылка	Размеры, мм		Расстояние между сгустками, $l$ мм	Энергия, $E_e$ МэВ	Кол-во сгустков $m$
	Продольный $\sigma_z$	Поперечный $\sigma_t$			
1 [16]	0,03	0,19	0,32	45	7
2 [14]	0,039	0,039	0,34	3,3	8
3 [17]	0,08	0,08	1,5	45	8
4 [18]	0,02	2,08	0,5	2,8	8
5 [19]	0,005	0,16	0,15	1,8	2
6 [20]	0,41	0,1	2,9	7,5	4
7 [21]	0,00003439	0,00005	0,00174	0,028	2
8 [15]	0,000001	0,005	0,0006	5	10
9 [22]	0,0000006	0,005	0,00000871	4,5	5
10 [23]	0,000123	0,01	0,00077	60	4

### 2.3 Расчет характеристик когерентного переходного излучения назад

Для расчета спектральных характеристик когерентного переходного излучения найденных последовательностей рассмотрим подробнее основы теории переходного излучения.

Переходное излучение - излучение, образующееся при пересечении заряженной частицей, раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью или при близком пролете к такому разделу [26]. Механизм этого излучения может быть объяснен динамической поляризацией электронных оболочек атомов среды [27]. Если заряженная частица будет падать из вакуума на мишень из металла с высокой проводимостью конечной толщины, как показано на рисунке 2.1, то переходное излучение будет наблюдаться, как в направлении «назад», так и «вперёд». Отсюда идет

разделение этого излучения на переходное излучение назад и вперед. Переходное излучение вперед испускается всегда вдоль траектории частицы, причем излучение формируется в виде конуса с минимумом по интенсивности вдоль траектории и максимумами, расположенными под углами  $1/\gamma$  к траектории частицы, где  $\gamma$  – Лоренц-фактор частицы (см. рисунок 2.1) [26].

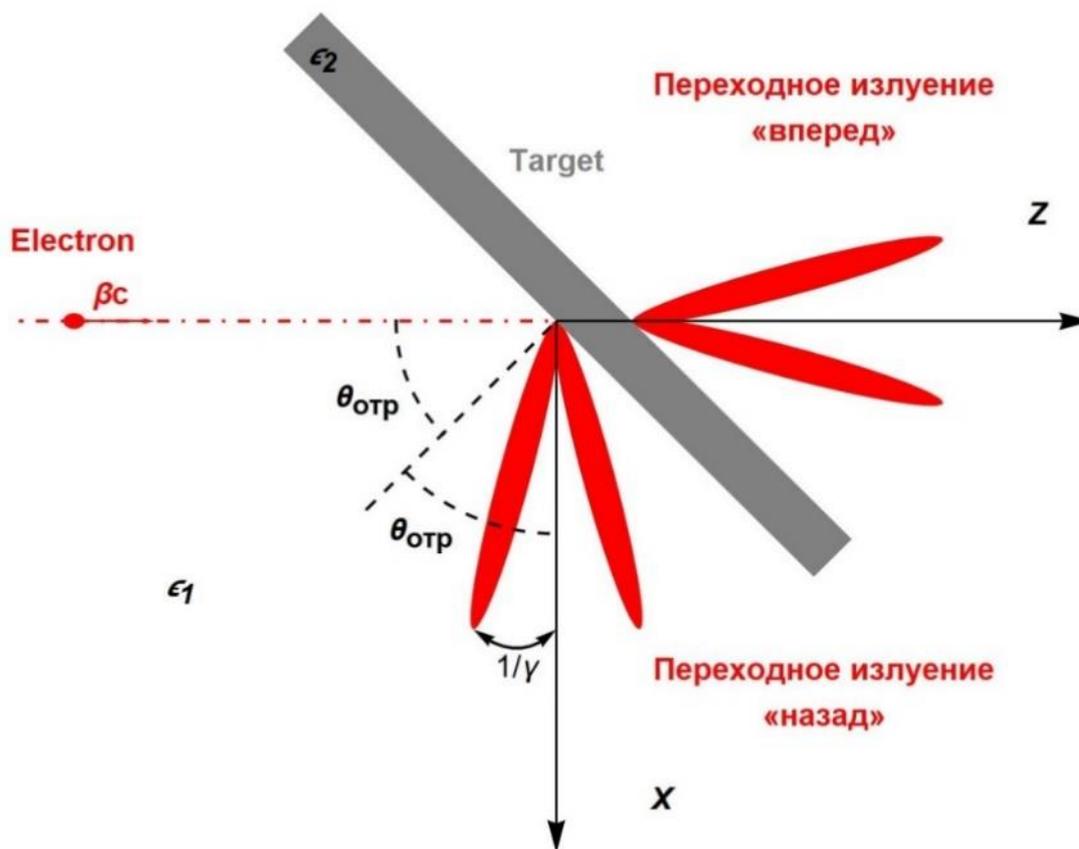


Рисунок 2.1 – Схема формирования переходного излучения при пересечении электроном мишени с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ , находящейся в вакууме ( $\epsilon_1$ )

Переходное излучение назад обладает тем же характером, но направленно не вдоль траектории частицы, а вдоль угла зеркального отражения  $\theta_{отр}$ , как если бы поле частицы претерпело отражение от поверхности раздела сред [26]. Именно этим свойством переходного излучения назад и пользуются при диагностике пучков заряженных частиц, так как оно позволяет размещать детектирующие системы вне траектории пучка. Источником излучения является область на поверхности раздела двух сред, электронные оболочки атомов которой возбуждаются кулоновским полем падающей частицы. Размер

этой области характеризуется величиной  $\gamma\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны излучения) [26]. Хотя источник переходного излучения и не является точечным, однако его можно считать таковым с расстояния, характеризующегося величиной  $\gamma^2\lambda$ . Такая область называется дальней волновой зоной и угловое распределение переходного излучения в ней не зависит от расстояния до источника. При расстояниях меньше  $\gamma^2\lambda$  наблюдается так называемая ближняя волновая зона, где размер источника переходного излучения уже играет свою роль, что сказывается на зависимости углового распределения переходного излучения от расстояния до источника. Разделение на дальнюю и ближнюю волновую зону вызвано такой характеристикой переходного излучения, как расходимость, которая равна  $\gamma^{-1}$  в дальней зоне.

Напомним аналитическое выражение для полного спектрально-углового распределения переходного излучения:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \left[ N + N(N-1)F(\omega, \vec{s}) \right] \cdot \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega}.$$

Спектрально-угловое распределение излучение от одного электрона  $\frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega}$ , при определенных условиях эксперимента в дальней волновой зоне можно считать постоянной величиной. В таком случае, при условии  $N(N-1) \gg N$ , когда вклад некогерентной части излучения незначителен, можно считать, что характер спектра излучения, в основном зависит от форм-фактора:

$$\left( \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} \right)_{norm} = F(\omega, \vec{s}),$$

здесь  $\left( \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} \right)_{norm}$  – полное спектрально-угловое распределение излучения,

нормированное на постоянный множитель  $\frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega} \cdot N(N-1)$ . Таким образом,

используя созданный ранее манипулятор, построим  $\left( \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} \right)_{norm}$  для случая

переходного излучения «назад» от найденных последовательностей электронных сгустков, в зависимости от частоты излучения. При моделировании будем считать, что последовательность электронных сгустков движется в вакууме (диэлектрическая проницаемость вакуума  $\varepsilon_1 = 1$ ) вдоль оси  $Z$ , пересекая плоскую металлическую мишень с бесконечной проводимостью (диэлектрическая проницаемость идеального проводника  $\varepsilon_2 = \infty$ ) и бесконечными размерами, повернутую вокруг оси  $Y$  на угол  $\theta_0 = 45^\circ$ , в правой системе координат, причем при  $\theta_0 = 90^\circ$  плоскость мишени перпендикулярна направлению движения электронов. Поскольку переходное излучение имеет угловое распределение, то есть, распространяется в пространстве в виде конуса, а не в виде сферы, необходимо поместить детектор в максимум углового распределения излучения, определяемого энергией электронов в пучке. Для соблюдения этого условия положим, что детектор удален от центра мишени на фиксированное расстояние в дальнюю волновую зону вдоль оси  $X$ , и зададим поворот вокруг оси  $Y$  на угол  $\theta_y = \theta_y^{\max}$ , определяемый средней энергией электронов  $E_e$  в последовательности сгустков, через соотношение:

$$\theta_y^{\max} = \frac{1}{\gamma} = \frac{m_e c^2}{E_e},$$

где  $m_e c^2$  – энергия покоя электрона ( $m_e c^2 \approx 0,511$  МэВ), а  $m_e$  – масса покоя электрона ( $m_e \approx 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг). Поворот вокруг оси  $Z$  примем равным нулю  $\theta_x = 0$ . Таким образом, детектор в модели эксперимента расположен в максимуме углового распределения переходного излучения в дальней волновой зоне наблюдения. Распределение электронов внутри сгустков описывается трёхмерным гауссовым распределением, а заряд между сгустками во всех последовательностях, кроме случая 5 (см. таблицу 2.1), распределен равномерно. Схема эксперимента представлена на рисунке 2.2. Моделирование осуществлялось в упоминавшемся ранее приложении-манипуляторе последней версии (приложение Б), где для расчета форм-фактора использовалась формула, полученная ранее в главе 1.

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_{x_p}^2 s_x^2 + \sigma_{y_p}^2 s_y^2 + \sigma_{z_p}^2 s_z^2) \right] \exp \left[ i \frac{\omega}{c} (x_p s_x + y_p s_y + z_p s_z) \right] \right|^2.$$

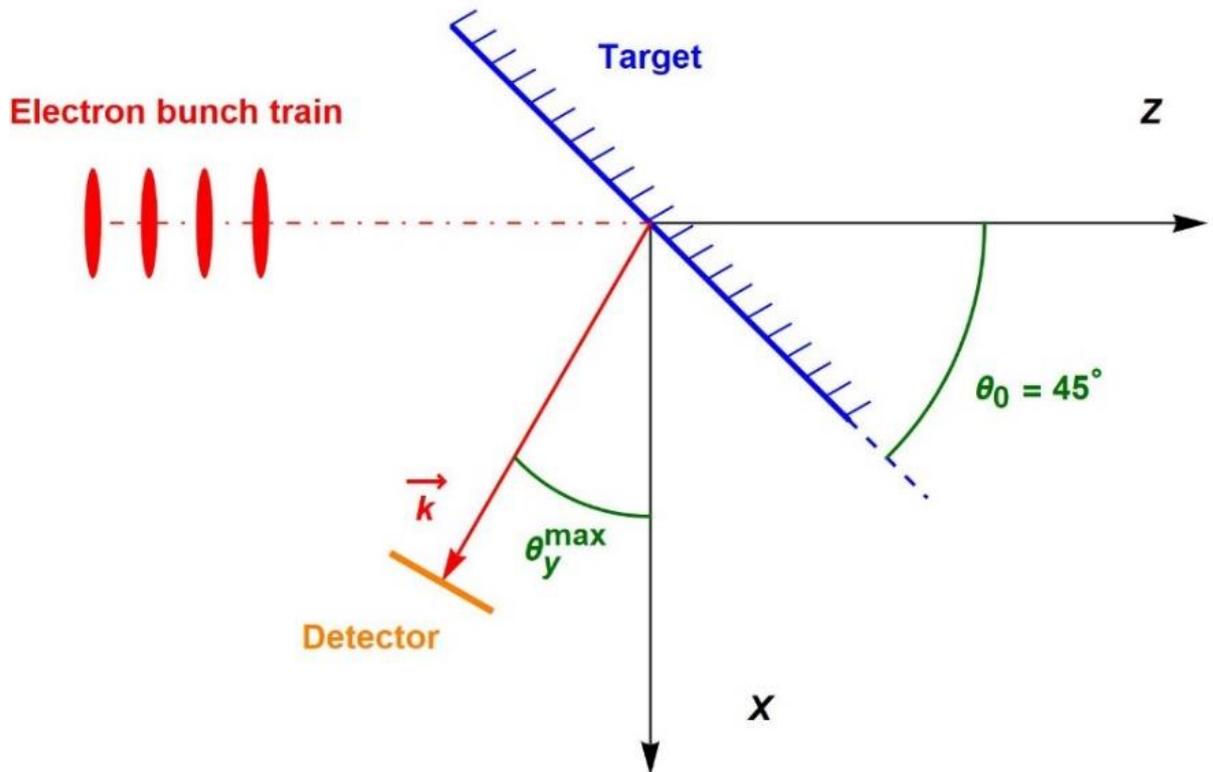


Рисунок 2.2 – Схема моделируемого эксперимента

Перед тем как приступить к рассмотрению полученных спектров оговоримся сразу, какими характеристиками в идеале должно обладать выходное излучение:

- излучение должно быть монохроматичным, т.е. пики на спектре должны быть как можно более узкими;
- пики на спектрах должны иметь четкую структуру без “паразитных” боковых шумов;
- пики должны быть высокими, т.е. излучение должно иметь высокую степень когерентности.

Ниже приведены графики полученных спектров, с небольшим описанием для каждого случая. На графиках помимо самих спектров также приведены усреднённые параметры последовательностей электронных сгустков и их визуализация “в профиль”.

Итак, на рисунке 2.3 представлен спектр излучения от последовательности электронных сгустков из статьи [16]. На спектре отчетливо прослеживается единичный пик, с максимальной интенсивностью  $\sim 0,5$  отн. ед., при частоте излучения в пике  $\sim 0,93$  ТГц.

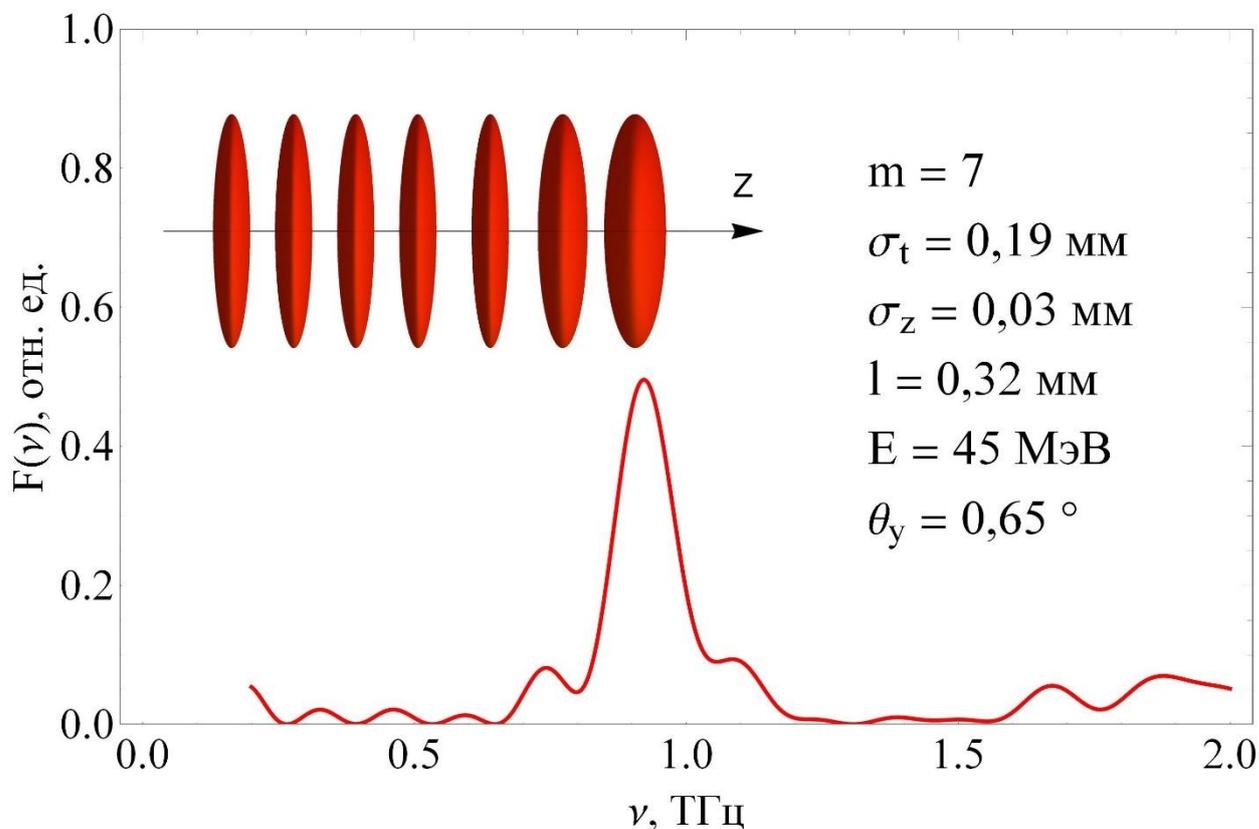


Рисунок 2.3 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [16]

В самой статье также приводится экспериментальный спектр излучения от подобной последовательности (в статье приводится несколько пучков), нормированный на максимальную интенсивность излучения. Однако прямо не указано, какими были углы наблюдения излучения и угол наклона мишени. К сожалению, это единственная статья из нашего списка, представляющая подобные экспериментальные данные. Для сравнения спектра, представленного в статье и полученного нами с помощью моделирования, мы оцифровали представленный спектр в условно бесплатной программе GetData Graph Digitizer [28] и также произвели нормировку графика на максимальную интенсивность, подобно тому, как это было сделано в статье. Сравнение полученных графиков представлено на рисунке 2.4.

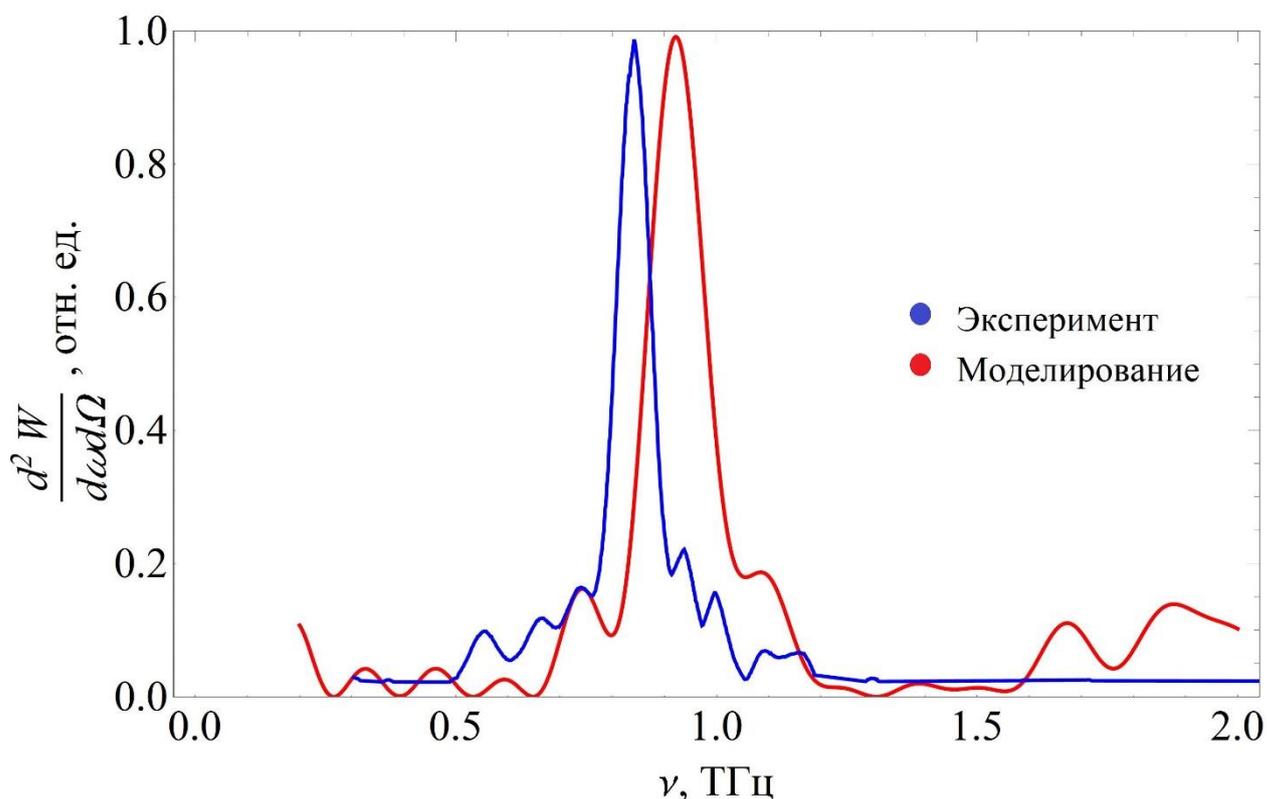


Рисунок 2.4 – Сравнение смоделированного спектра с экспериментальным спектром, представленным в статье [16]

Как можно видеть, поведение линий спектров на графиках довольно схоже. Наблюдается небольшое смещение модельного спектра в более высокочастотный диапазон. В самой статье также упоминается, что положение единичного пика варьируется в пределах от 0,7 до 1 ТГц. Это утверждение соответствует наблюдаемой нами картине. Однако, повторяюсь, подобное сравнение не совсем корректно, поскольку мы не обладаем всем данными для получения экспериментального спектра, в частности, мы не знаем, каким был наклон мишени, положение детектора, и для какой именно последовательности сгустков (невзирая на их схожесть) были получены представленные экспериментальные данные. В целом можно отметить перспективность использования последовательностей с подобными параметрами в качестве источника ТГц излучения.

Рисунок 2.5 демонстрирует спектр излучения от последовательности электронных сгустков, представленной в статье [14]. На спектре можно

наблюдать очень широкий пик около с центральной частотой 0,8 ТГц, однако его интенсивность едва достигает 0,2 отн. ед, что практически не выделяет его из боковых шумов. В целом, отсутствие монохроматичных пиков, низкая интенсивность и нечеткая структура делает данный спектр не интересным с точки зрения использования представленной последовательности в качестве источника ТГц излучения.

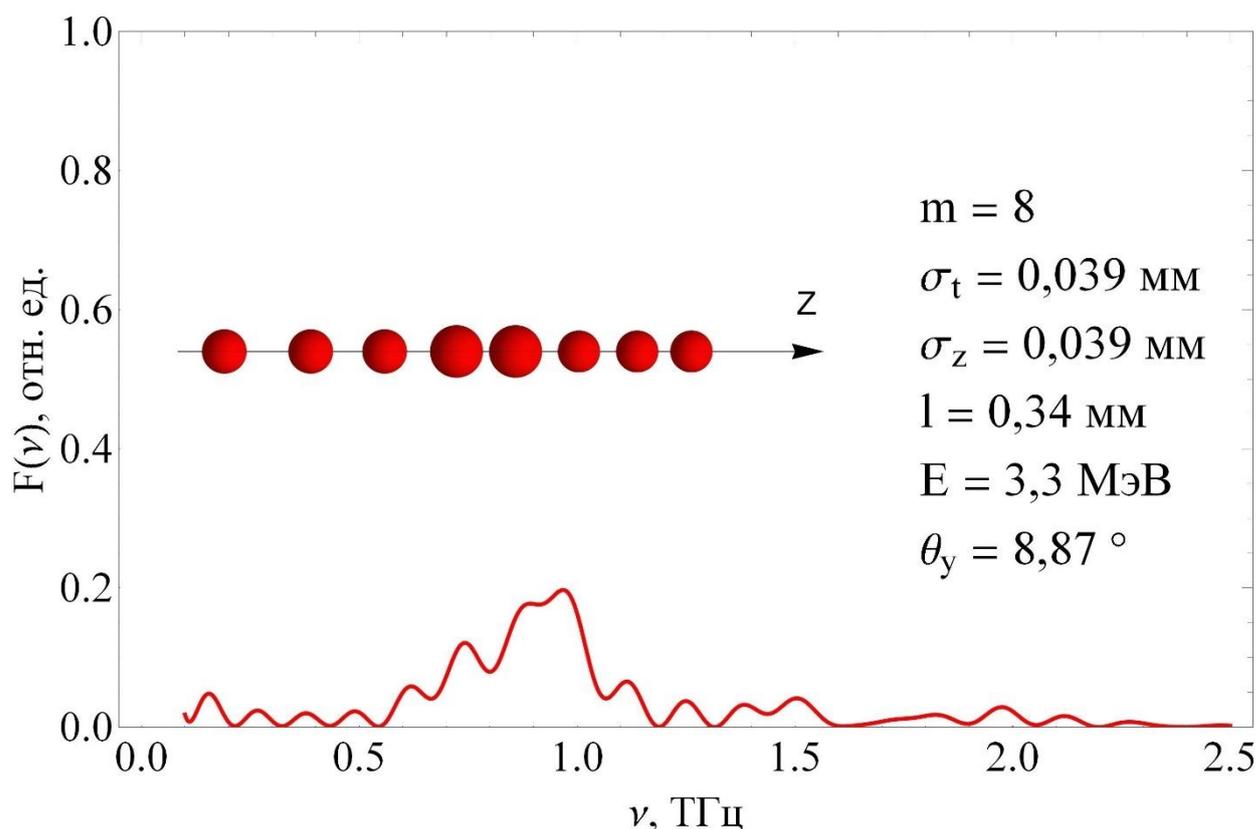


Рисунок 2.5 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [14]

На рисунке 2.6 приведен спектр излучения от последовательности электронных сгустков из статьи [17]. Спектр имеет 6 узких хорошо различимых пиков с четкой структурой и одинаковым частотным интервалом между пиками в 0,2 ТГц. Интенсивность пиков уменьшается по мере увеличения частоты излучения. Интенсивность самого высокого пика около 0,9 отн. ед. на частоте 0,2 ТГц, самого низкого – менее 0,05 отн. ед. на частоте 1,2 ТГц. Такая гармония поведения линий спектра объясняется тем, что при моделировании использовались только усредненные параметры последовательности (что можно видеть на визуализации), за неимением более подробных данных в

статье. Тем не менее, данный спектр выглядит наиболее перспективным источником ТГц излучения, так как пики спектра достаточно узкие, высокие и практически лишены шумов на боковых частотах. Пожалуй, единственный их недостаток – они расположены в долях ТГц диапазона. Тем не менее, от этого можно уйти, изменив, например, продольный размер сгустков в меньшую сторону (см. следующую часть главы). Таким образом, используя этот источник можно получить излучение высокой монохроматичности и интенсивности.

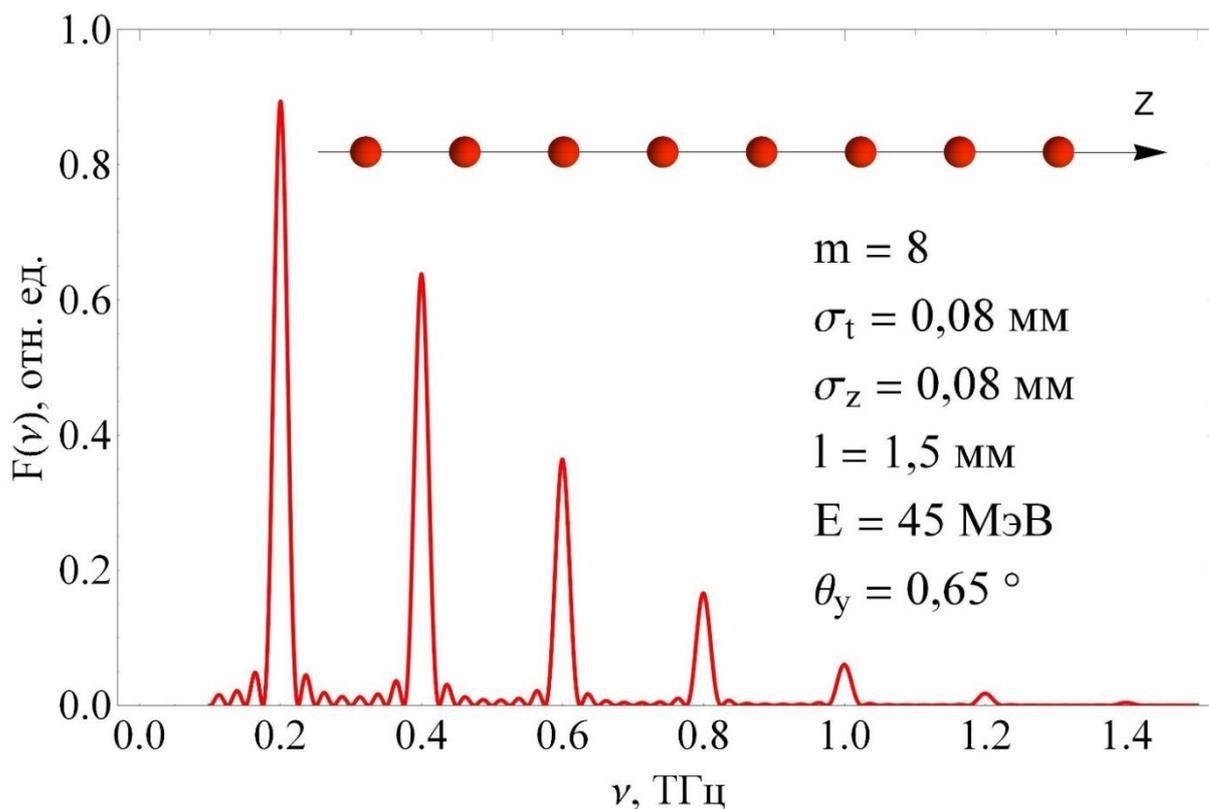


Рисунок 2.6 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [17]

Спектр излучения от последовательности из статьи [18] представлен на рисунке 2.7. Сама последовательность интересна тем, что поперечный размер изменяется от сгустка к сгустку. Тем не менее, это практически никак не сказывается на характеристике излучения, поскольку изменения не выражены в достаточной мере. Данный спектр, как и спектр, представленный на рисунке 2.3, имеет единичный пик в диапазоне нескольких долей ТГц, но с меньшим максимумом интенсивности – чуть меньше 0,3 отн. ед. приходящимся

на частоту  $\sim 0,37$  ТГц. Пик имеет четкую структуру без выраженных паразитных пиков.

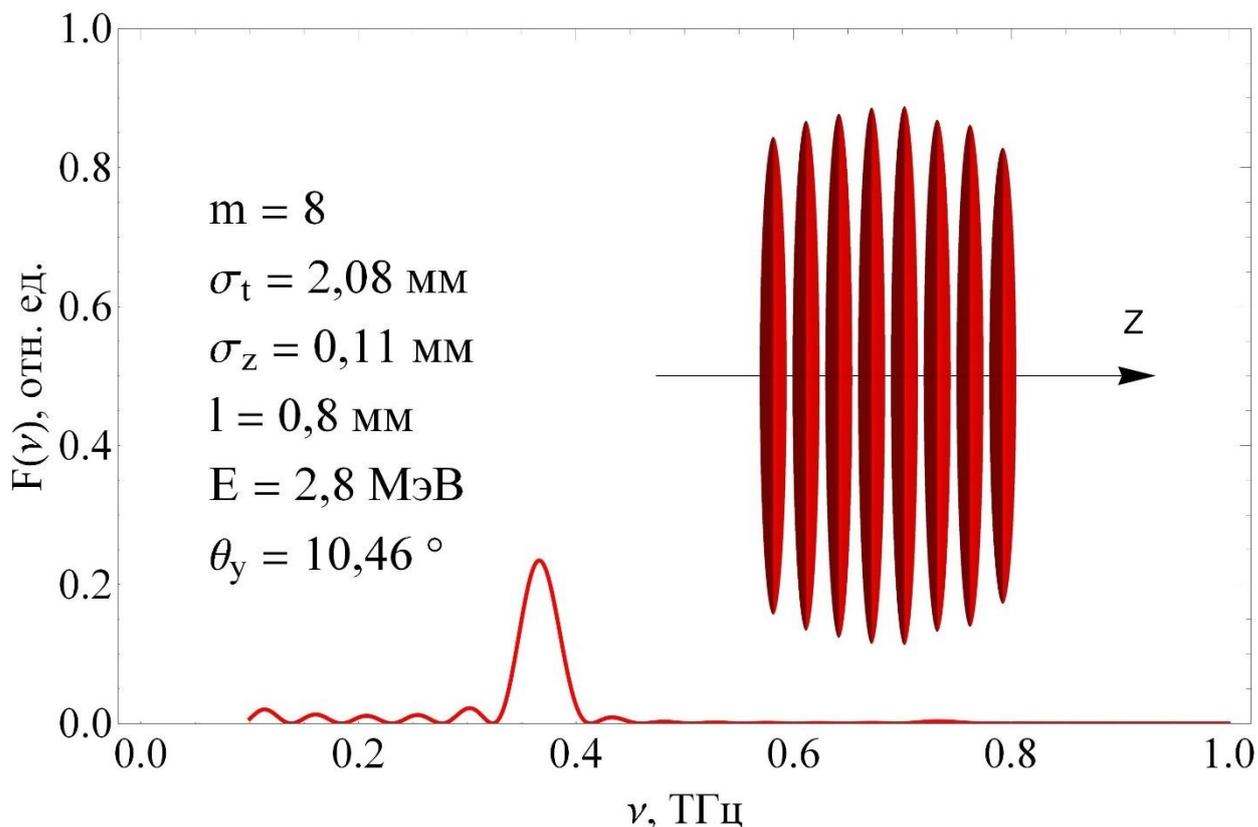


Рисунок 2.7 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [18]

Далее разберем спектр, полученный от последовательности сгустков, представленной в статье [19] (рисунок 2.8). Спектр интересен в первую очередь тем, что здесь учтено распределение заряда между сгустками. Сам график представляет плавно нисходящую линию, без каких-либо характерных особенностей. Красным цветом обозначена линия спектра, построенного с учетом распределения заряда в сгустках, которое, в соответствии с информацией, приведенной в статье, составило 3:1, то есть 75% электронов от общего числа в последовательности было сконцентрировано в первом сгустке и оставшиеся 25% – во втором (сгустки отсчитываются справа налево). Синяя линия представляет собой тот же спектр, но для равномерного распределения заряда в последовательности, когда количество электронов в обоих сгустках одинаково. Как можно видеть, учет распределения заряда позволил избавиться от минимума интенсивности, немного приподняв линию спектра в области от 0

до примерно  $\sim 1,4$  ТГц. Далее, обе линии слились в одну. Таким образом, можно заключить, что учет распределение заряда в последовательности может иметь очень большое влияние на итоговый вид спектра.

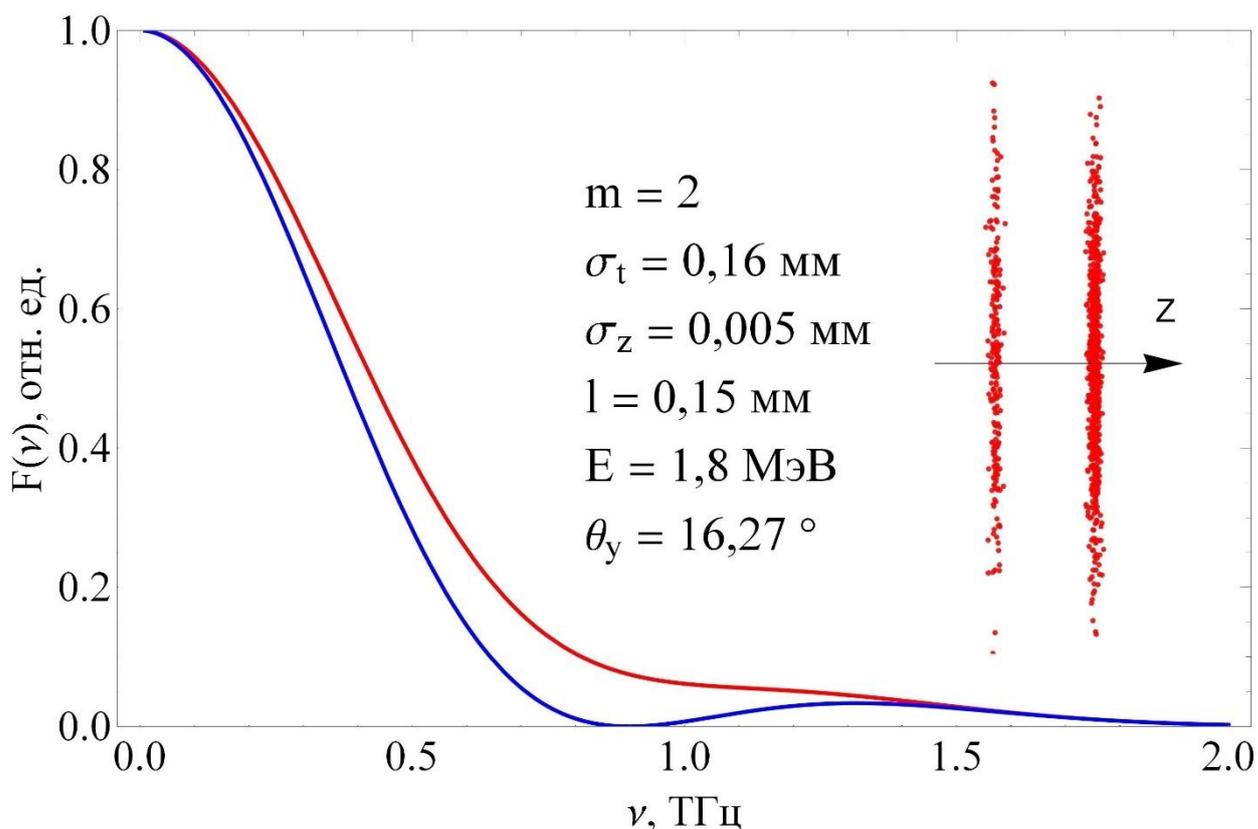


Рисунок 2.8 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [19]

Следующий спектр, представленный на рисунке 2.9, получен от последовательности из статьи [20]. В данной последовательности продольный размер сгустков в несколько раз больше поперечного. Спектр имеет единичный хорошо различимый пик интенсивностью чуть больше 0,4 отн. ед. расположенный на частоте около 0,1 ТГц. Тем не менее, это довольно низкие частоты, а потому сама последовательность не интересна как источник ТГц излучения.

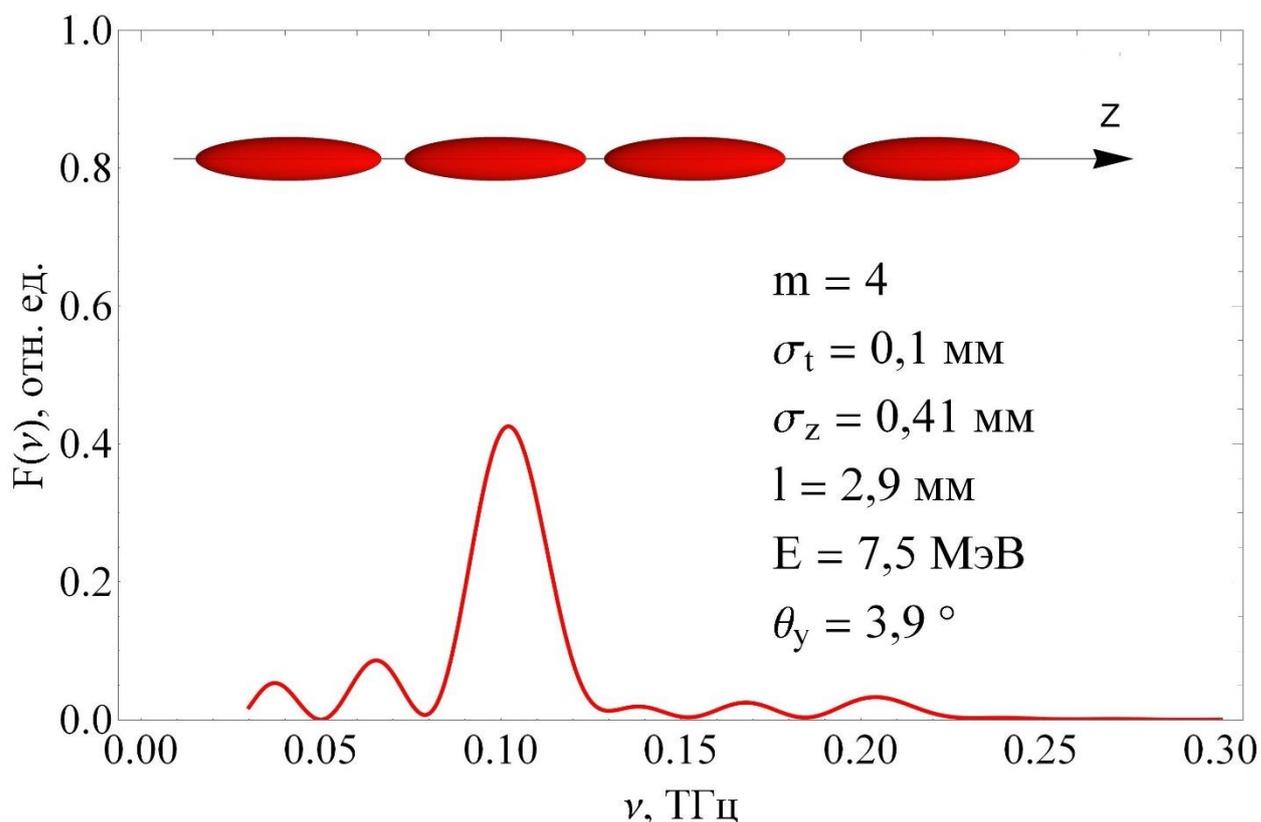


Рисунок 2.9 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [20]

Далее мы переходим к рассмотрению спектров от последовательностей электронных сгустков аттосекундной длительности. В этом случае мы не будем анализировать спектры на предмет использования в качестве источников ТГц излучения, поскольку частотный диапазон изучения от подобных последовательностей сгустков будет очевидно исчисляться уже сотнями ТГц. Ограничимся лишь описанием и рассмотрением особенностей полученных спектров. Соотношение размеров сторон поперечного и продольного размера в представленных на графиках визуализациях последовательностей сгустков в представленных далее случаях не является равным 1:1.

Итак, первый спектр от последовательности с аттосекундными сгустками из статьи [21] представлен на рисунке 2.10. Пики достаточно широкие из-за малого количества сгустков (всего два сгустка) в последовательности. Тем не менее, они хорошо различимы. Спектр представляет собой спадающую волнообразную зависимость в диапазоне от 0 до 600 ТГц. Частотный диапазон между пиками составляет 100 ТГц. Интересно, что электроны в

последовательности не являются релятивистскими и, согласно статье, параметр  $\beta$  для них составляет  $\beta = 0,32$ , что нетрудно получить из представленной на графике энергии.

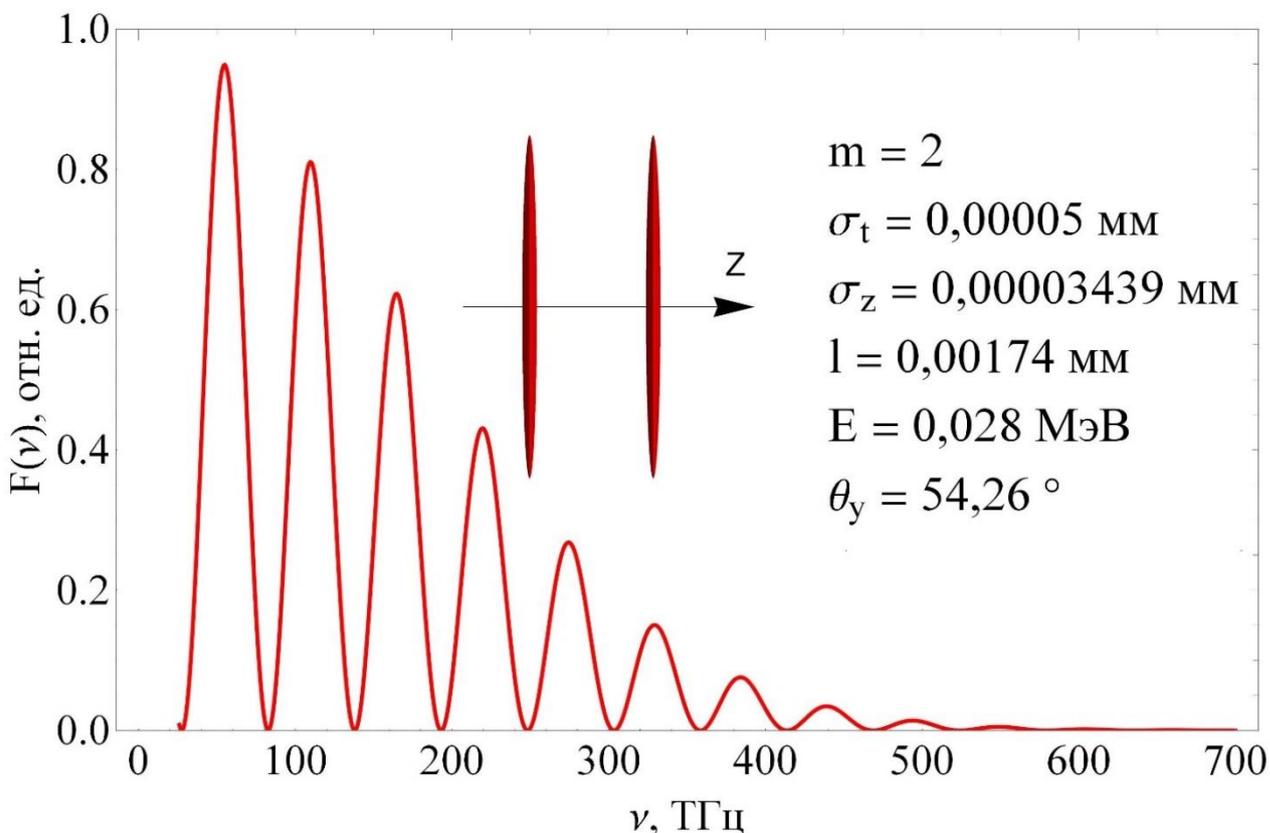


Рисунок 2.10 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [21]

Следующий спектр излучения, представленный на рисунке 2.11, получен для последовательности сгустков из статьи [15]. Последовательность интересна тем, что содержит максимальное количество сгустков (10 сгустков) среди всех найденных нами последовательностей. Спектр имеет единичный пик с максимумом интенсивности чуть менее 0,3 отн. ед. на частоте 500 ТГц.

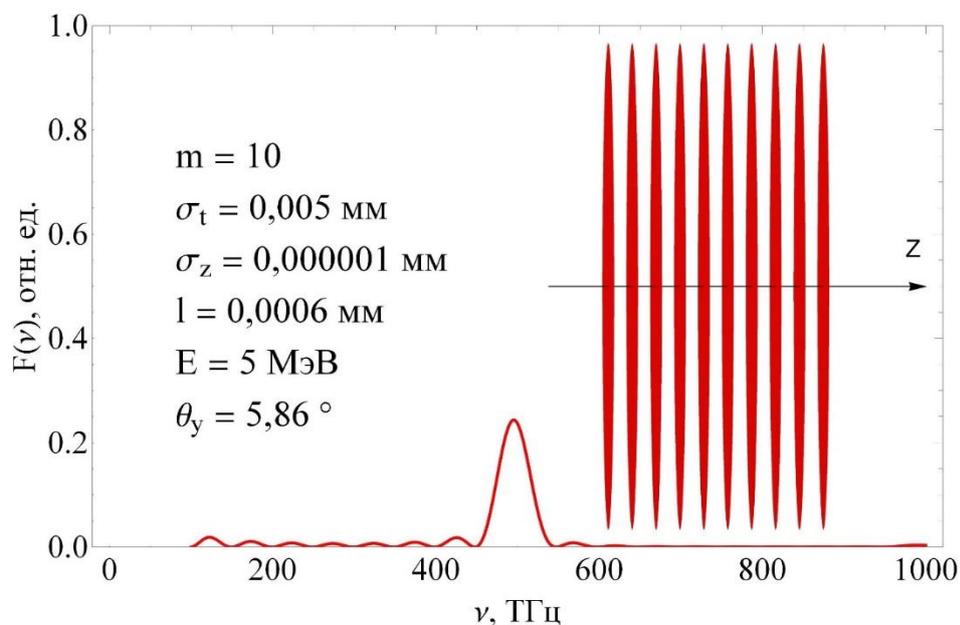


Рисунок 2.11 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [15]

Спектр на рисунке 2.12 получен для последовательности электронных сгустков из статьи [22]. Этот спектр интересен тем, что, несмотря на то что продольный размер достаточно мал, спектр не имеет ярко выраженных пиков, из-за огромных (относительно продольного) поперечных размеров, и также относительно небольшого расстояния между сгустками. Таким образом, график напоминает спектр от одного электрона – плавную нисходящую линию в частотном диапазоне от 0 до около 200 ТГц.

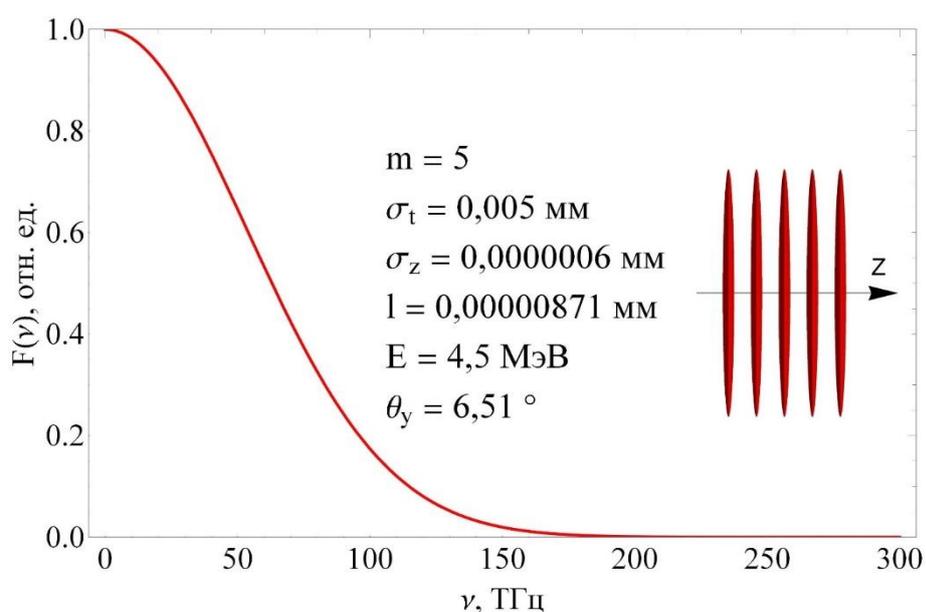


Рисунок 2.12 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [22]

Спектр на рисунке 2.13 получен от подпоследовательности электронных сгустков представленной в статье [23]. Последовательность обладает самой большой средней энергией электронов в сгустке из представленных аттосекундных последовательностей. На спектре можно наблюдать единственный, довольно широкий пик на 400 ТГц, интенсивностью около 0,4 отн. ед.

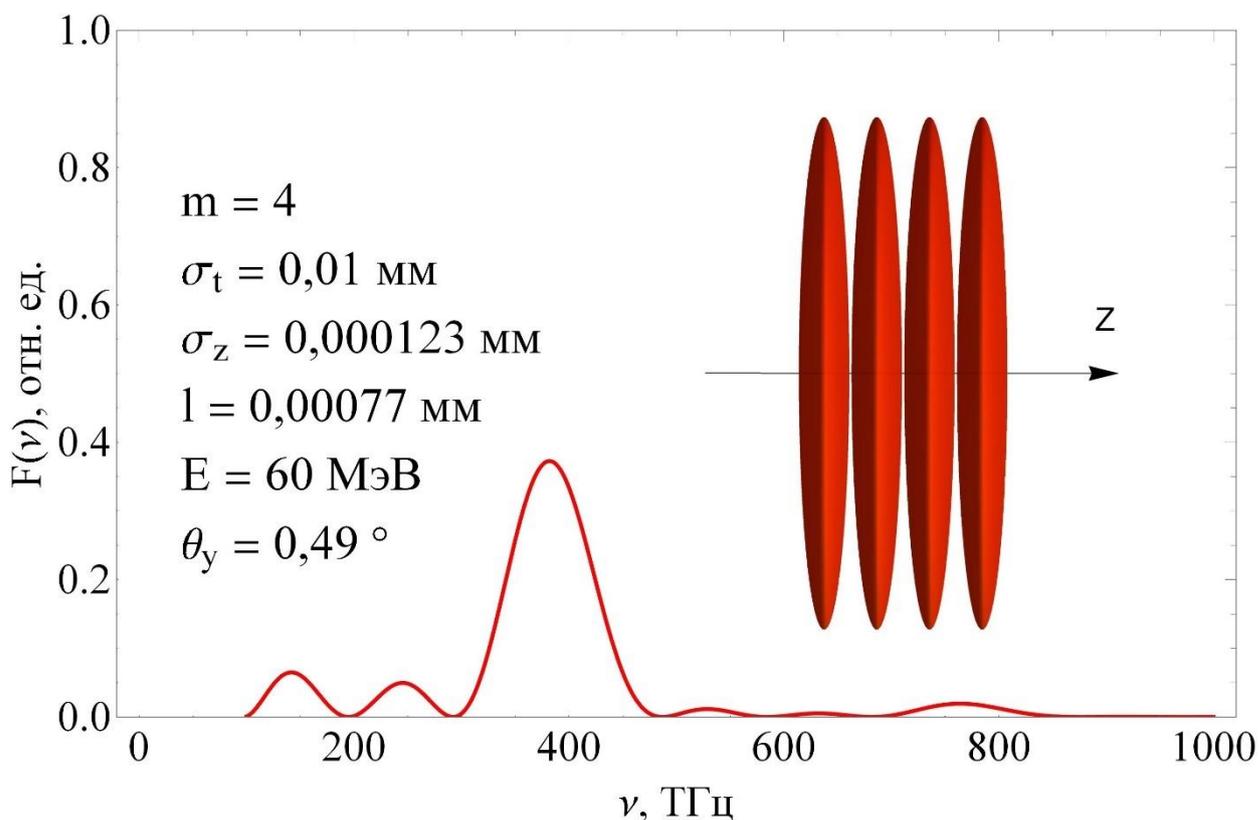


Рисунок 2.13 – Спектр от последовательности сгустков из статьи [23]

В целом, излучение от последовательностей электронных сгустков аттосекундных длительностей, представленных в найденных статьях, по своему характеру мало чем отличается от излучения от последовательностей электронных сгустков фемтосекундных длительностей. Основным отличием является порядок диапазона частот, на котором можно наблюдать характерные особенности спектра для той или иной последовательности. Для сгустков фемтосекундной длительности в представленных случаях он ограничен десятками ТГц, для сгустков аттосекундных длительностей – сотнями ТГц.

## 2.4 Анализ форм-фактора для произвольного распределения сгустков

Для того чтобы получить излучение с заранее заданными характеристиками, необходимо точно представлять, как влияет тот или иной параметр последовательности электронных сгустков на вид выходного излучения. В этой части главы представлен анализ влияния на характер излучения следующих параметров последовательности: количество сгустков в последовательности, средняя энергия электронов в пучке, расстояние между сгустками, продольный и поперечный размер сгустков, распределение заряда в последовательности. Анализ затрагивает только равномерные последовательности, за исключением случая по рассмотрению влияния распределения заряда в последовательности. Таким образом, рассматривается одна из формул форм-фактора для случая переходного излучения, полученная ранее в главе 1, а именно:

$$F(\omega, \vec{s}) = \exp \left[ -\frac{\omega^2}{c^2} (\sigma_x^2 s_x^2 + \sigma_y^2 s_y^2 + \sigma_z^2 s_z^2) \right] \left| \sum_{p=1}^m \mu_p \exp \left[ -i \frac{\omega}{c} l \cdot (p-1) s_z \right] \right|^2,$$

$$\vec{s} = \begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\cos \theta_y \cos \theta_x - \cot \theta_0 \left( \sin \theta_y - \frac{1}{\beta} \right) \\ -\cos \theta_y \sin \theta_x \\ -\frac{1}{\beta} \end{Bmatrix}.$$

Напомним,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – характерные размеры сгустка по оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , соответственно,  $m$  – количество сгустков в последовательности,  $\omega$  – циклическая частота излучения  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\mu_p$  – нормированная доля заряда в  $p$ -ом сгустке от общего заряда всей последовательности,  $l$  – расстояние между сгустками,  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $s_z$  – компоненты вектора  $\vec{s}$ , определяющего вид излучения (в данном случае переходного),  $\theta_0$  – угол наклона мишени относительно оси  $Y$  в правой системе координат, связанной с мишенью,  $\theta_y$ ,  $\theta_x$  – углы, задающие положение детектора в

пространстве,  $\beta$  – отношение скорости электронов  $\mathcal{V}$  к скорости света,  $\beta = \frac{\mathcal{V}}{c}$ , называемое так же безразмерной скоростью и связанное со средней энергией электронов в сгустке  $E_e$  через Лоренц-фактор как  $\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \left(\frac{m_e c^2}{E_e}\right)^2}$ .

Для моделирования форм-фактора была использована более ранняя версия манипулятора (приложение Д), созданная специально для равномерных последовательностей сгустков. При проведении анализа некоторые условия моделируемого эксперимента, как и в предшествующей части главы, оставались одинаковыми. Так, вновь полагалось, что плоская мишень имеет бесконечные размеры и сделана из металла с бесконечной проводимостью, средой распространения последовательности электронных сгустков и выходного излучения является вакуум, угол наклона мишени  $\theta_0 = 45^\circ$ , детектор находится в дальней зоне наблюдения излучения, электроны в сгустках распределены согласно гауссовому закону. Помимо этого было решено задавать углы наблюдения не нулевыми, для того, чтобы яснее видеть закономерность влияния параметров пучка на характер излучения, когда коэффициенты поперечных компонент этого излучения  $s_x$  и  $s_y$  не равны нулю. Таким образом, положение детектора было решено задавать углами  $\theta_y = 5^\circ, \theta_x = 5^\circ$ . Спектр охватывает единицы ТГц диапазона.

Перейдем непосредственно к самому анализу. На рисунке 2.14 приведен график форм-фактора в зависимости от частоты выходного излучения для случая 1, 2, 5, 15 и 100 сгустков. Остальные параметры последовательности для моделирования представлены на графике. В случае одного сгустка на графике не прослеживаются каких-либо пиков или шумов, а сам график представляет из себя пологую нисходящую линию (как и должно быть для одного сгустка). С увеличением количества сгустков в последовательности появляются ярко выраженные пики, ширина которых тем меньше, чем больше количество сгустков в последовательности. Также начинают появляться боковые шумы

низкой интенсивности. Таким образом, с увеличением количества сгустков в последовательности излучение становится все более и более монохроматичным на определенных частотах.

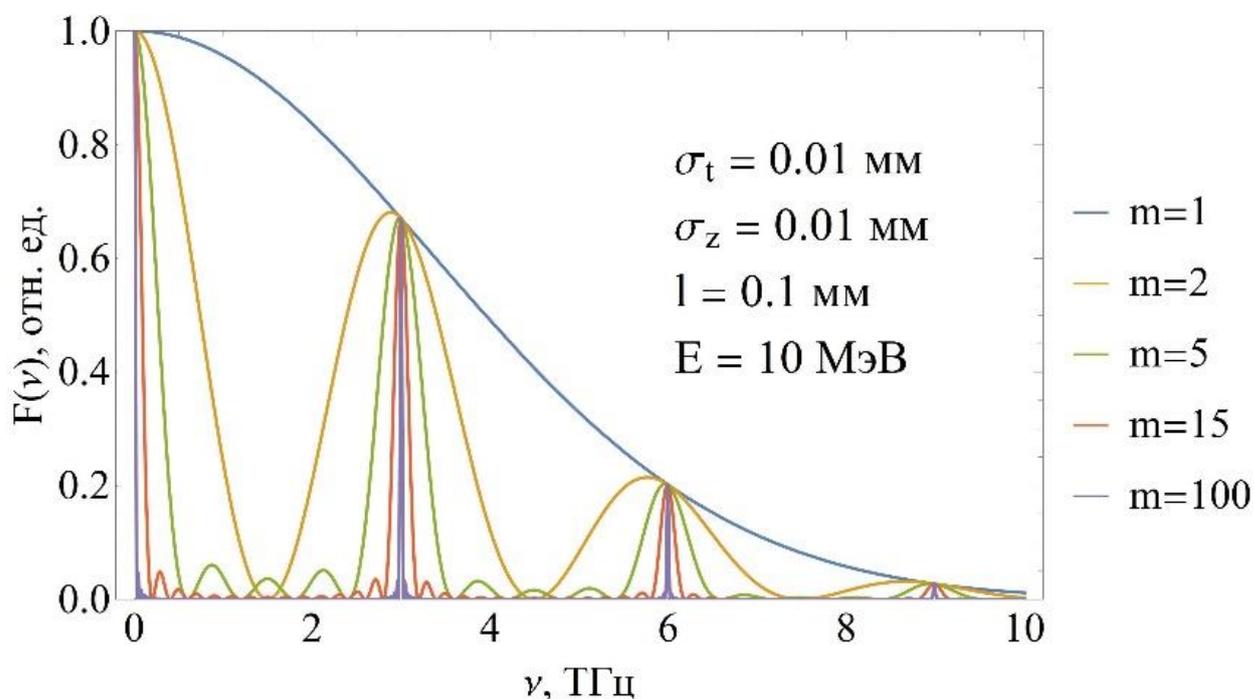


Рисунок 2.14 – К анализу влияния количества электронных сгустков в последовательности на спектр излучения

На рисунке 2.15 приведен график форм-фактора в зависимости от частоты выходного излучения для случая, когда средняя энергия электронов в последовательности равна 1, 1,5, 5 и 1000 МэВ. Моделирование проводилось для пятидесяти сгустков в последовательности, для лучшего отображения зависимости, поскольку в этом случае пики очень узкие и хорошо различимы на графике (см. предыдущий пункт). Остальные параметры последовательности для моделирования представлены на графике. Как можно видеть на рисунке 2.15, увеличение средней энергии электронов в последовательности приводит к небольшому смещению пиков в более высокочастотный диапазон спектра без потери их интенсивности, однако, начиная примерно с 10 МэВ и далее это смещение практически незаметно, сравните например положение пика при 5 и 1000 МэВ. Стоит отметить, что чем выше порядок пика (будем отсчитывать

порядок от нулевой частоты, то есть, слева направо), тем ярче выражено его смещение при увеличении энергии.

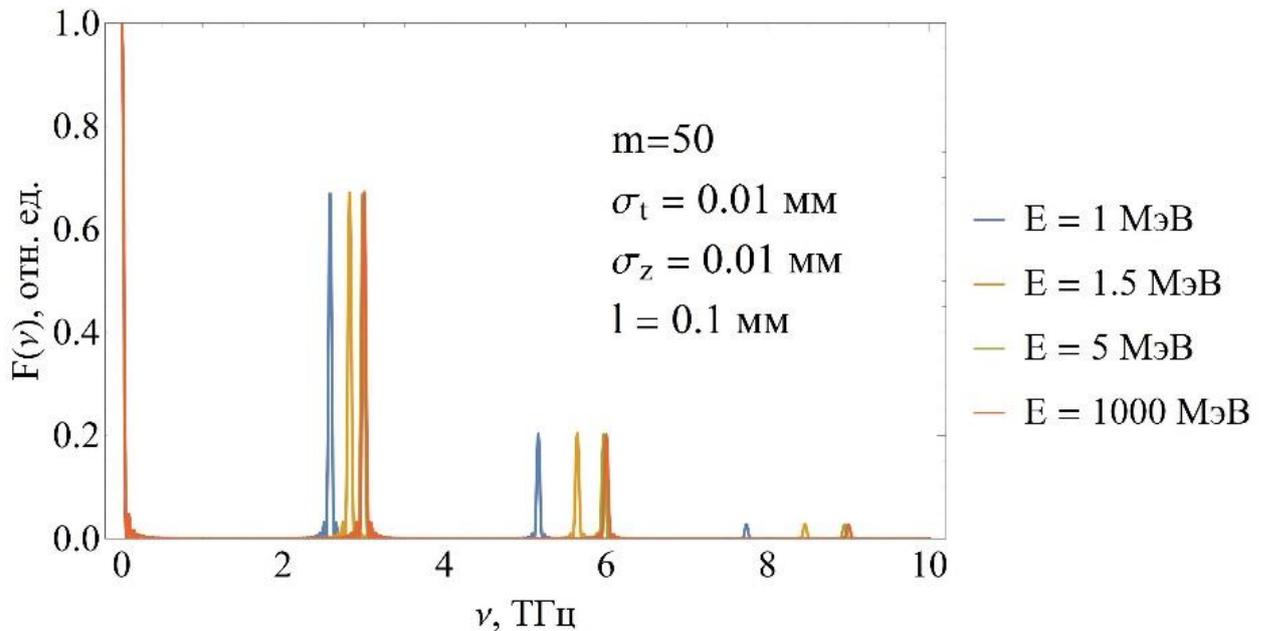


Рисунок 2.15 – К анализу влияния средней энергии электронов в последовательности сгустков на спектр излучения

Далее рассмотрим влияние на спектр такого параметра, как расстояние между сгустками, при некоторых постоянных параметрах моделирования, приведенных на графике. Как можно видеть на рисунке 2.16, увеличение расстояния приводит к тому, что характерные пики смещаются в низкочастотную часть спектра, при этом их интенсивность не выходит за линию интенсивности излучения для одного сгустка, расстояние между пиками сокращается. Таким образом, увеличивая расстояния между сгустками, можно увеличить количество пиков в заданном частотном диапазоне.

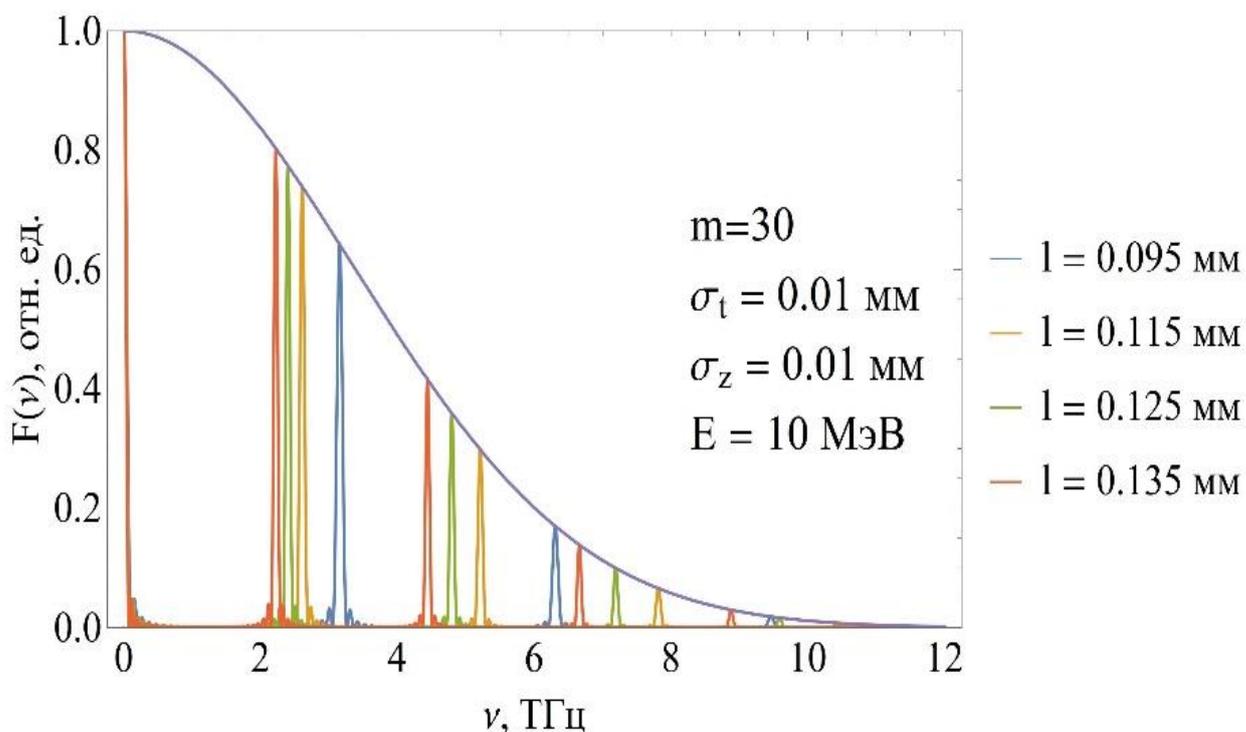


Рисунок 2.16 – К анализу влияния расстояния между сгустками в последовательности на спектр излучения

Рассмотрим влияние продольного размера сгустков на вид форм-фактора. В данном случае ограничимся последовательностью из трех сгустков, т. к. ширина пиков должна быть достаточной, чтобы увидеть характер изменений на графике. Постоянные параметры также приведены на рисунке 2.17. При увеличении продольного размера при некотором заданном расстоянии между сгустками есть вероятность слияния трех сгустков в один. В этом случае график лишится характерных пиков и будет представлять собой сплошную нисходящую линию, поэтому при анализе данного параметра необходимо также ориентироваться на параметр расстояния между сгустками. Итак, при увеличении продольного размера наблюдается уменьшение интенсивности пиков на шкале, то есть уменьшается степень когерентности излучения. Обратите внимание на шаг, с которым уменьшается размер. Это важно при сравнении с влиянием поперечных размеров на характер излучения.

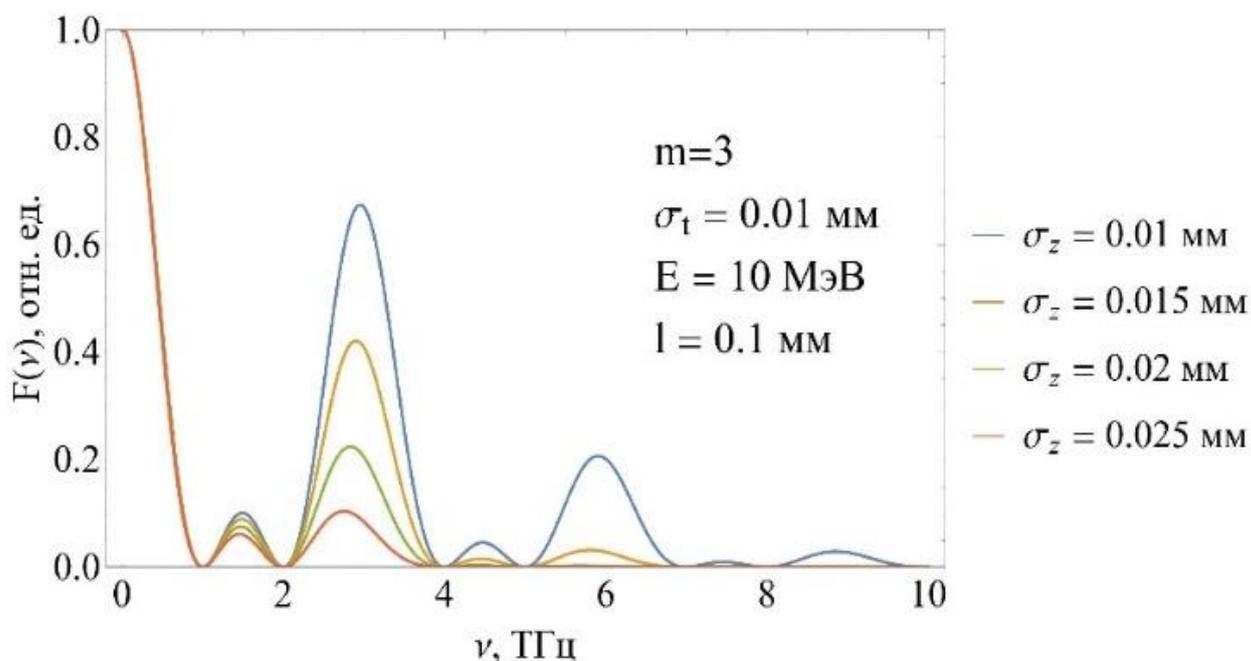
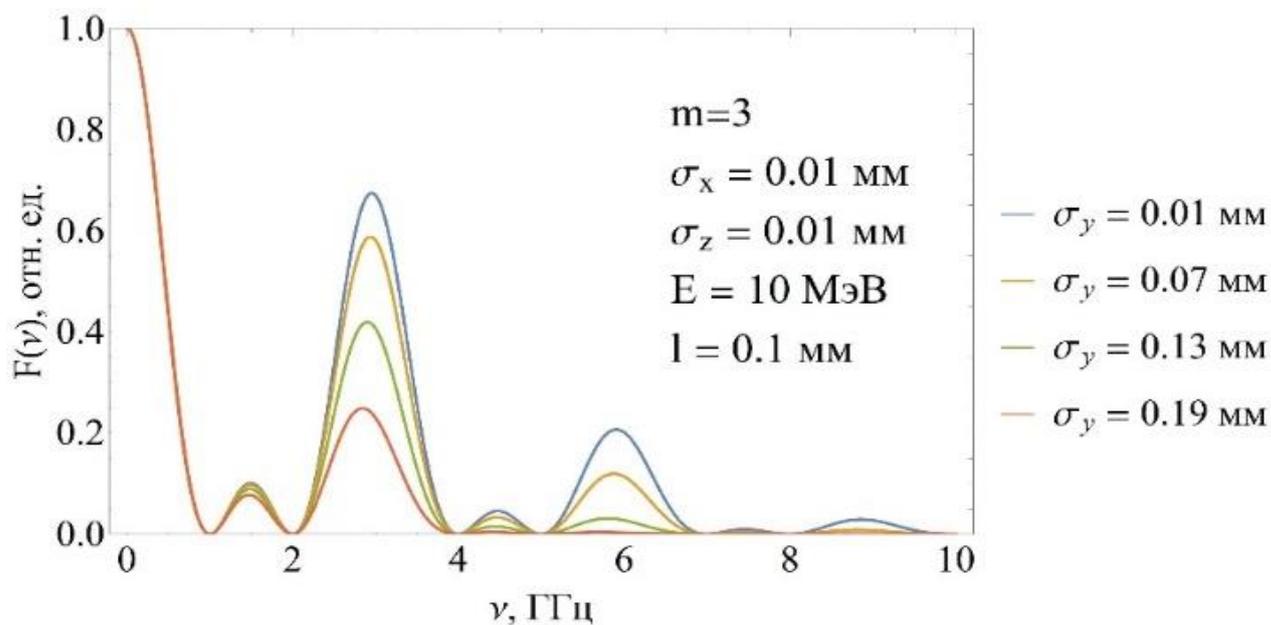
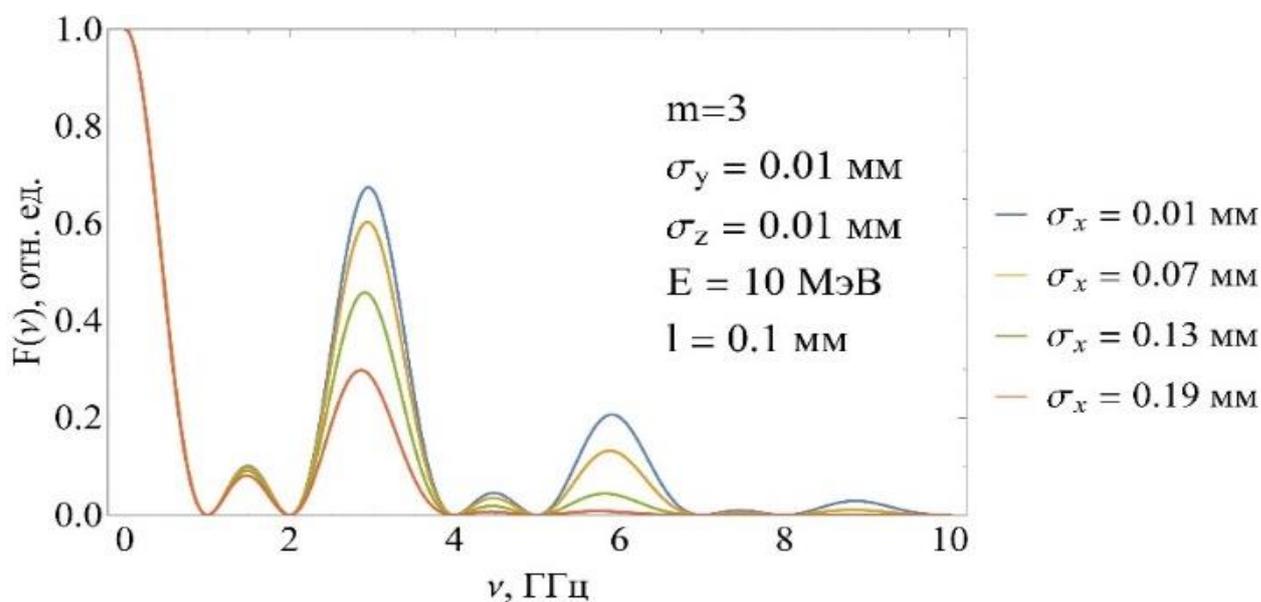


Рисунок 2.17 – К анализу влияния продольного размера сгустков в последовательности на спектр излучения

Рассмотрим влияние поперечных размеров по осям  $Y$  и  $X$  на спектр, при тех же параметрах последовательности сгустков (рисунок 2.18). В целом, при увеличении этих размеров наблюдается та же тенденция к уменьшению высоты пиков, что наблюдалась при увеличении продольного размера, с той лишь разницей, что характер изменений выражен не так явно, как в первом случае. Для того чтобы убедиться в этом достаточно взглянуть на шаг, с которым менялись поперечные размеры. Разница между изменением характерного размера по оси  $Y$  и характерного размера по оси  $X$  присутствует, но не слишком заметна и вытекает из неравенства компонент  $s_x$  и  $s_y$ , в частности, высота пиков при увеличении  $\sigma_x$ , как правило, больше высоты пиков при увеличении  $\sigma_y$  на то же значение при прочих равных условиях моделирования. В целом, при увеличении поперечных размеров степень когерентности излучения уменьшается.



а)



б)

Рисунок 2.18 – К анализу влияния поперечного размера сгустков в последовательности по оси  $X$  (а) и по оси  $Y$  (б) на спектр излучения

Завершает цепочку анализа параметр распределения суммарного заряда в последовательности сгустков (рисунок 2.19). Данный параметр выбивается из представленных тем, что последовательность сгустков с неравномерным распределением заряда уже считается неравномерной, однако, мы будем рассматривать лишь простые симметричные распределения, что не составит большой проблемы, как если бы это было некоторое хаотичное распределение.

Итак, при нормальном (гауссовом) распределении заряда в последовательности, наблюдается небольшое уширение пика по сравнению с равномерным распределением и сглаживание боковых шумов. Еще большее уширение достигается при треугольном распределении заряда в последовательности. Отсюда можно сделать вывод, что распределение заряда в последовательности отличное от равномерного приводит к уменьшению монохроматичности излучения. Данный вывод, тем не менее, основан на сравнении только трех распределений, потому автор допускает его неточность.

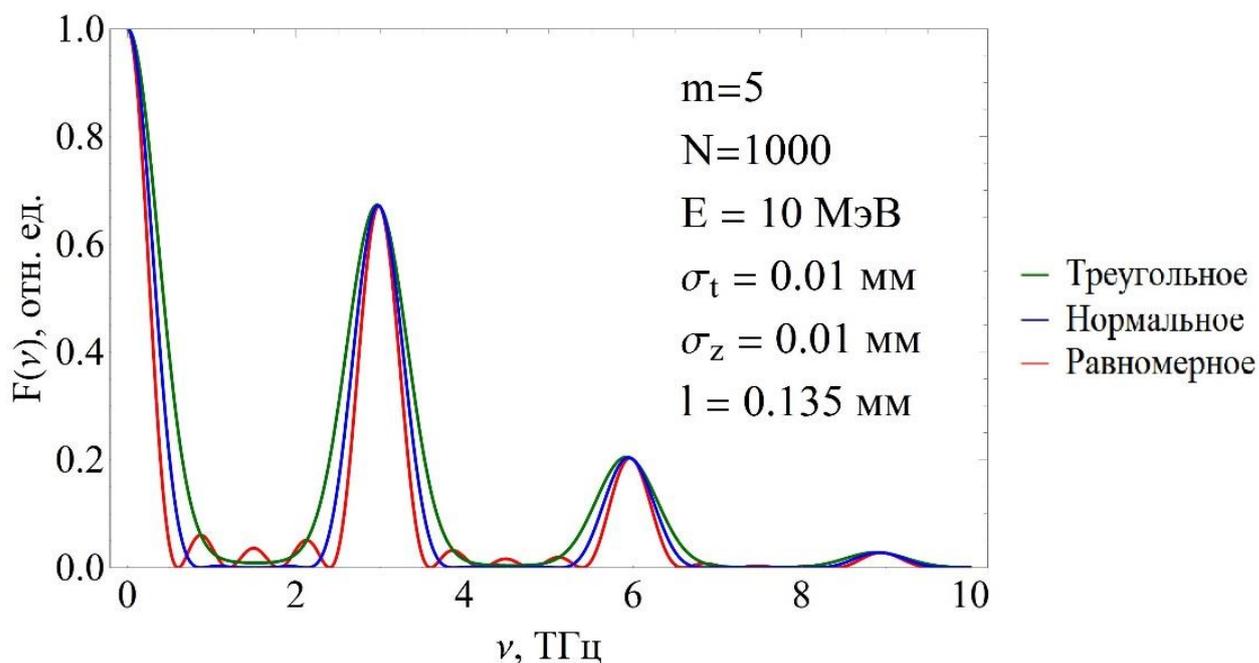


Рисунок 2.19 – К анализу влияния распределения суммарного заряда между сгустками в последовательности на спектр излучения

Таким образом, проведенный анализ позволяет выделить некоторые рекомендации к преобразованию существующих или планируемых к реализации последовательностей электронных сгустков, для получения спектров излучения с желаемыми характеристиками, такими как высокая степень когерентности и монохроматичность излучения. Вкратце рекомендации приведены в таблице ниже.

Таблица 2.2 – Рекомендации к преобразованию сгустков

Параметр	Рекомендация
Энергия электронов	Довести до 10 МэВ
Расстояние между сгустками	Сохранять одинаковым, варьировать по необходимости для смещения пиков по шкале
Поперечный размер сгустков по оси X	Уменьшить
Поперечный размер сгустков по оси Y	Уменьшить
Продольный размер сгустков	Уменьшить
Распределение заряда между сгустками в последовательности	Задавать равномерным
Количество сгустков	Увеличить

Приведем краткие пояснения к таблице. Для получения излучения с желаемыми характеристиками необходимо увеличить количество сгустков в пучке, чем их больше – тем более монохроматическое излучение мы получаем. Энергию электронов можно довести до 10 МэВ для незначительного сдвига пиков в более высокочастотный диапазон без потери их интенсивности, увеличение энергии практически не приводит к дальнейшему смещению, также это повлияет на вид спектрально-углового распределения излучения от одного электрона и позволит быстро выйти на плато с максимальной интенсивностью. Необходимо стараться, чтобы сгустки в последовательности распределялись равномерно, так можно избежать появления паразитных боковых пиков. Высота пиков (степень когерентности излучения) в ТГц диапазоне тем больше, чем меньше продольные и поперечные размеры сгустков. Также для регулировки положения пиков по частотной шкале можно варьировать расстояние между сгустками, однако, при смещении в высокие частоты высота пиков будет уменьшаться (из-за когерентного порога излучения), а их плотность на шкале увеличиваться, хотя это не представляется проблемой в случае использования фильтров излучения. Распределение заряда в

последовательности электронных сгустков оптимально задавать равномерным, поскольку остальные (например, гауссово, треугольное) распределения приводят к уширению пиков.

## **2.5 Выводы по разделу**

Итак, суммируем все вышеописанное. В разделе в общих чертах описаны несколько способов генерации последовательностей сверхкоротких электронных сгустков. Больше и более подробное описание методов требует очень тщательного разбора иностранной литературы по теме, что не являлось нашей прямой задачей. Произведена выборка параметров десяти последовательностей электронных сгустков из англоязычных научных статей последних двух десятилетий. Далее проведено моделирование спектров переходного излучения от параметров найденных последовательностей электронных сгустков. Длительность сгустков в последовательностях варьировалась от пары десятков атто- до нескольких сотен фемтосекунд. Моделирование осуществлялось в приложении-манипуляторе представленном в первой главе. Полученные спектры оказались достаточно разнообразны. Фемтосекундные последовательности дают излучение в диапазоне от нескольких долей до нескольких единиц ТГц, аттосекундные – от нескольких десятков до нескольких сотен ТГц. В целом, большая часть из фемтосекундных последовательностей сгустков пригодна в качестве источников мягкого ТГц излучения. Спектры от некоторых последовательностей, тем не менее, нуждаются в модификации. Изначально, в работе была поставлена задача выяснить, как можно получить высокоинтенсивное и монохроматическое переходное излучение от последовательностей электронных сгустков. Для этого был проведен анализ влияния параметров последовательности электронных сгустков на спектр выходного излучения, с использованием возможности приложения-манипулятора динамически менять параметры последовательности и наблюдать изменения в режиме реального времени. Данный анализ позволяет ответить на вопрос, “что и как нужно изменить в последовательности, чтобы получить излучение с заранее известными

характеристиками”. Были приведены и конкретные рекомендации к преобразованию последовательностей для получения высокоинтенсивного, монохроматического излучения в высокочастотном диапазоне. Так, основной вклад в то, насколько излучение будет монохроматичным, вносит количество сгустков в последовательности. На интенсивность излучения в основном влияют размеры сгустков и расстояния между ними. Тем не менее, нельзя не отметить недостатки анализа, в частности то, что он основан на непосредственном наблюдении за изменением только одного из выбранных параметров. То есть, непонятно, как будет меняться спектр, если мы будем изменять одновременно два, три или сразу четыре параметра. На этот вопрос, возможно, поможет ответить анализ с использованием решения задач многопараметрической оптимизации, планируемый в будущем. Еще одним недостатком является то, что анализ затрагивает только равномерные последовательности, исключая случай, когда мы анализируем влияние распределения заряда в последовательности сгустков. Однако, насколько целесообразно проведение анализа влияния на спектр неравномерных последовательностей – пока неясно. Возможно, это имеет смысл, когда ведется работа с конкретной неравномерной последовательностью сгустков.

### **3. 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.

Цель данной ВКР – исследование свойств переходного излучения от различных последовательностей электронных сгустков, для создания источников высокоинтенсивного монохроматического излучения различных частотных диапазонов. Для моделирования спектров необходимо создать программы, учитывающие дополнения в теории, что поможет точнее предсказывать, и следовательно, точнее рассчитывать параметры реальных экспериментов, в более короткие сроки и с меньшими затратами ресурсов.

#### **3.1 Оценка коммерческого потенциала проводимого НИ**

##### **3.1.1 Анализ конкурентных технических решений**

В данной работе рассматриваются два варианта моделирования спектров когерентного излучения в пакете Wolfram Mathematica, являющимся на сегодняшний день бесплатным инструментом программирования.

Вариант 1 – программа, проводящая моделирование с использованием аналитического подхода, когда расчёт спектра производится в приближении независимого распределения частиц в сгустке, выраженных непрерывной аналитической функцией.

Вариант 2 – код для расчета спектров методами численного моделирования, когда учитывается положение каждого электрона в последовательности электронных сгустков.

В оценочной карте сравнены сильные и слабые стороны конкурирующих технических решений.

Сравнительный анализ осуществляется по наиболее важным показателям 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 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 1	Вар. 2
1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
Соответствие результатов моделирования результатам реального эксперимента	0,14	4	5	0,56	0,7
Скорость расчета	0,13	5	1	0,65	0,13
Возможность задавать экзотические пространственные распределения электронов	0,12	2	5	0,24	0,6
Возможность ведения параллельных расчётов	0,11	5	1	0,55	0,11
Визуализация	0,1	5	1	0,5	0,1
Требования к техническим навыкам	0,09	5	3	0,45	0,27
Гибкость кода	0,08	5	5	0,4	0,4
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
Затраты на ресурсы	0,14	5	4	0,7	0,56
Предполагаемый срок эксплуатации	0,09	5	4	0,45	0,36
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>41</b>	<b>29</b>	<b>4,5</b>	<b>3,23</b>

Результаты анализа, представленные в таблице 3.1, позволяют заключить, что конкурентоспособность аналитического метода моделирования выше численного по большей части показателей, особенно в тех случаях, когда большой точность расчетов можно пренебречь в угоду скорости. Тем не менее, эти показатели могут измениться если облечь код варианта 2 в более интуитивно понятный интерфейс и создать полноценную программу подобно варианту 1, но на данном этапе это возможность не реализована, к тому же, численные методы всегда будут уступать по скорости аналитическим, и это безусловно один из самых больших минусов варианта 2.

### 3.1.2 SWOT-анализ

Таблица 3.2 – SWOT-анализ

	<p><b>Strengths (сильные стороны)</b>  S1. Позволяет учесть любое пространственное распределение сгустков в последовательности;  S2. Позволяет провести расчет спектра на любом компьютере в любое время;  S3. Возможность совершенствования кода;  S4. Интуитивно понятный интерфейс программы, позволяет обходиться без навыков программирования;  S5. Возможность динамически изменять параметры сгустков и геометрии эксперимента в режиме реального времени;  S6. Высокая скорость расчета спектров;  S7. Визуализация эксперимента.</p>	<p><b>Weaknesses (слабые стороны)</b>  W1. Заданные формулы справедливы только для бесконечной плоскопараллельной мишени с бесконечной проводимостью;  W3. Подходит только для распределений электронов в сгустках, описываемых аналитической формулой.</p>
<p><b>Opportunities (возможности)</b>  O1. Проведение моделирования перед постановкой эксперимента;  O2. Диагностика размеров сгустков по реальным спектрам;  O3. Создание новых установок на базе предсказательных моделей;  O4. Использование программы в обучающих целях;</p>	<p>O1O2S1S4S5S6S7 – провести оценку качества работы программы на реальном эксперименте и выложить программу в общественный доступ;  O3S1S5S6S7 – смоделировать спектры излучения с желаемыми характеристиками и представить параметры сгустков для воссоздания на реальных установках;  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>O1O2W1 – ввести дополнительные геометрии мишеней и задать их в программу, если это необходимо в эксперименте;  O1O2W2 – совместить с кодом для расчета спектров от каждой частицы в сгустке, в случае когда распределение невозможно задать аналитически.</p>
<p><b>Threats (угрозы)</b>  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, задавая форму мишени аналитической формулой;  T1W2 – интегрировать в программу код, на базе численного моделирования и использовать этот подход в случае экзотических распределений электронов в сгустках.</p>

Таблица 3.3 – Связь сильных сторон с возможностями

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

Таблица 3.4 – Связь слабых сторон с возможностями

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

Таблица 3.5 – Связь сильных сторон с угрозами

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

Таблица 3.6 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2
T1	+	+

## 3.2 Планирование НИР

### 3.2.1. Структура работ в рамках НИР

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 3.7.

Таблица 3.7 – 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 для расчета спектров аналитическим методом	Инженер
	7	Создание программного кода для расчета спектров численным методом	Инженер
	8	Контроль созданных программ	Руководитель Инженер
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ закономерностей влияния параметров сгустков на характеристики излучения	Инженер
	10	Моделирование спектров от реальных сгустков	Инженер
	11	Сравнение полученных результатов	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

### 3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения работ

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:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5},$$

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  $T_{pi}$ :

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i},$$

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

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 3.8.

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. 3.1.

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:

$$T_{кi.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{кi.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где  $k_{кал}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

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»:

$$t_{\text{ож } i} = \frac{3t_{\text{min } i} + 2t_{\text{max } i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2.8 \text{ чел.-дн.},$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{ож } i}}{\text{Ч}_i} = \frac{2.8}{1} = 2.8 \text{ раб. дн.},$$

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»:

$$T_{\text{ки.инж}} = T_{\text{pi}} \cdot k_{\text{кал}} = 1.9 \cdot 1.48 = 2,432 \approx 2 \text{ кал.дн.}$$

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 3.8.

Таблица 3.8 – 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 НИР	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	3	-
Формирования теоретической и практической базы	-	7	-	14	-	9,8	-	9,8	-	13
Создание программного кода для расчета спектров аналитическим методом	-	7	-	14	-	9,8	-	9,8	-	13
Создание программного кода для расчета спектров численным методом	-	7	-	14	-	9,8	-	9,8	-	13
Контроль созданных программ	2	2	4	4	2,8	2,8	1,4	1,4	2	2
Анализ закономерностей влияния параметров сгустков на характеристики излучения	-	3	-	7	-	4,6	-	4,6	-	6
Моделирование спектров от реальных сгустков	-	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4
Сравнение полученных результатов	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1	1
Контроль качества выполнения работ и консультирование исполнителя	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-
Составление пояснительной записки к программному коду	-	3	-	7	-	4,6	-	4,6	-	6
<b>Итого</b>	<b>10</b>	<b>43</b>	<b>23</b>	<b>84</b>	<b>15,2</b>	<b>59,4</b>	<b>11,3</b>	<b>55,2</b>	<b>16</b>	<b>72</b>

Таблица 3.9 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	88
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	72
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	16

№		Исп.	$T_{ki}$ , Кал.дн.	Продолжительность работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение технического задания	Исп1	4	■													
2	Выбор направления исследований	Исп1 Исп2	4		■												
3	Подбор и изучение материалов по теме	Исп2	12		■	■											
4	Календарное планирование работ по проведению НИР	Исп1	3			■											
5	Формирования теоретической и практической базы	Исп2	13			■	■										
6	Создание программного кода для расчета спектров аналитическим методом	Исп2	13					■	■								
7	Создание программного кода для расчета спектров численным методом	Исп2	13						■	■							
8	Контроль созданных программ	Исп1 Исп2	4									■					
9	Анализ закономерностей влияния параметров сгустков на характеристики излучения	Исп2	6										■	■			
10	Моделирование спектров от реальных сгустков	Исп2	4											■			
11	Сравнение полученных результатов	Исп1 Исп2	2												■		
12	Контроль качества выполнения работ и консультирование исполнителя	Исп1	4												■		
13	Составление пояснительной записки к программному коду	Исп2	6													■	

Примечание:

■ – Исп. 1 (научный руководитель), ■ – Исп. 2 (инженер)

Рисунок 3.1 – Диаграмма Ганта

### 3.3 Бюджет научного 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, представленным в таблице 3.15.

#### 3.3.1 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 3.10.

Таблица 3.10 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб.	Затраты, руб.
Бумага офисная А4	уп.	1	350	403
Канцелярские товары	уп.	1	200	230
Итого, руб.			633	

### 3.3.2 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 3.11 – Затраты на оборудование

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
Ноутбук Acer TravelMate P259	1	5	38,5	38,5
<b>Итого:</b>				38500 руб.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{365} \cdot d,$$

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

Рассчитаем амортизацию для ноутбука Acer TrevelMate P259, с учётом, что срок полезного использования 5 лет:

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

$$A = \frac{H_A \cdot I}{365} \cdot d = \frac{0.2 \cdot 38500}{365} \cdot 88 = 1856 \text{ руб.},$$

Полученное значение занесено в Таблицу 3.12.

Таблица 3.12 – Суммарные затраты амортизационных отчислений

Наименование оборудования	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Срок полезного использования, лет	Срок пользования в рамках проекта, дн.	Амортизационные отчисления, руб.
Ноутбук Acer TrevelMate P259	45	5	88	1856
<b>Итого:</b>	1856 руб.			

### 3.3.3 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  $Z_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 3.8).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формулам:

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

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

где  $Z_m$  – должностной оклад работника за месяц;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 3.13);  $M$  – 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):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{30420 \cdot 10,3}{217} = 1443,9 \text{ руб.},$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 20000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 39000 \text{ руб.},$$

Для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 15600 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 30420 \text{ руб.},$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 3.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

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

Таблица 3.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{\text{тс}}$ , руб	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб	$T_{\text{р}}$ , раб. дн	$Z_{\text{осн}}$ , руб
Руководитель	20000	0,3	0,2	1,3	39000	2041,1	11	22452,1
Инженер	15600	0,3	0,2	1,3	30420	1443,9	55	79414,5
Итого:								101866,6

### 3.3.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 22452,1 = 3367,8 \text{ руб.},$$

Для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 79414,5 = 11912,2 \text{ руб.},$$

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

### 3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0.3 \cdot (22452,1 + 3367.8) = 7745,97 \text{ руб.},$$

Для инженера:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0.3 \cdot (79414,5 + 11912.2) = 27398 \text{ руб.},$$

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).

### 3.3.6 Накладные расходы

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

Накладные расходы в целом:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \dots 5) \cdot k_{\text{нр}} = \\ = (1856 + 633 + 38500 + 101866,6 + 15280 + 35144) \cdot 0.2 = 38655,9 \text{ руб.},$$

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 3.15.

Таблица 3.15 – Группировка затрат по статьям

Статьи								
Амортизация	Сырье, материалы	Специальное оборудование	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
1856	633	38500	101866,6	15280	35144	193279,6	38655,9	231935,5

### **3.4 Определение ресурсоэффективности исследования**

#### **3.4.1 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 231935,5 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 241935,5 руб.

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 240 935,5 руб.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

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

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

Рассчитаем значения интегрального финансового показателя для различных вариантов исполнения:

Вариант 1:  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{231935,5}{241935,5} = 0,959;$

Вариант 2:  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{241935,5}{241935,5} = 1;$

Вариант 3:  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}3} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{240935,5}{241935,5} = 0,996;$

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.

### 3.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

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

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

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 3.16.

Таблица 3.16 – 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 используемого варианта исполнения исследования:

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

Расчет интегрального показателя для альтернативных вариантов исполнения:

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

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

### 3.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

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

$$I_{\text{исп1}} = \frac{I_{p1}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}}} = \frac{4}{0,959} = 4.17 ;$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность исполнения исследовательской работы и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 3.17). К примеру, для исполнения 2 сравнительная эффективность ( $E_{\text{ср,2}}$ ):

$$E_{\text{ср,2}} = \frac{I_{\text{исп2}}}{I_{\text{исп1}}} = \frac{3.8}{5.57} = 0.682 ;$$

Таблица 3.17 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,959	1	0,996
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4	3.8	4
3	Интегральный показатель эффективности	4,17	3.8	4,02
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,911	0,964

### 3.5 Выводы по разделу

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

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

2. 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 – 88 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 72 и

общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 16;

3. Составлен бюджет научного исследования, позволяющий оценить затраты на его реализацию, которые составляют 231935,5 руб.;

4. По факту оценки эффективности НИ, можно сделать следующие выводы:

- Значение интегрального финансового показателя НИ составляет 0,959, 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 4.17, по сравнению с 3.8 и 4,02, и является наиболее высоким, что означает, что было выбрано наиболее эффективный вариант исполнения научно-исследовательской работы.

## **4. Социальная ответственность**

В разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на процесс исследования, воздействие исследуемого объекта на окружающую среду, правовые и организационные вопросы, а также мероприятия в чрезвычайных ситуациях.

В работе проводится дополнение теории и разрабатываются методы моделирования спектров когерентного излучения от плоских металлических мишеней на основе последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительности. Исследование применимо в области физике высоких энергий и ускорительной технике для диагностики пучков заряженных частиц. Результаты работы также могут быть использованы в качестве дополнительно образовательного материала по вышеобозначенным дисциплинам. Основная работа по моделированию проводилась в 11 корпусе Томского политехнического университете на ноутбуке Acer TrevelMate P259. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания программных инструментов для проведения масштабных исследований свойств когерентного излучения.

### **4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя)**

#### **правовые нормы трудового законодательства**

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации, каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником.

#### **4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации.

То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как изображено на рисунке 5.1.

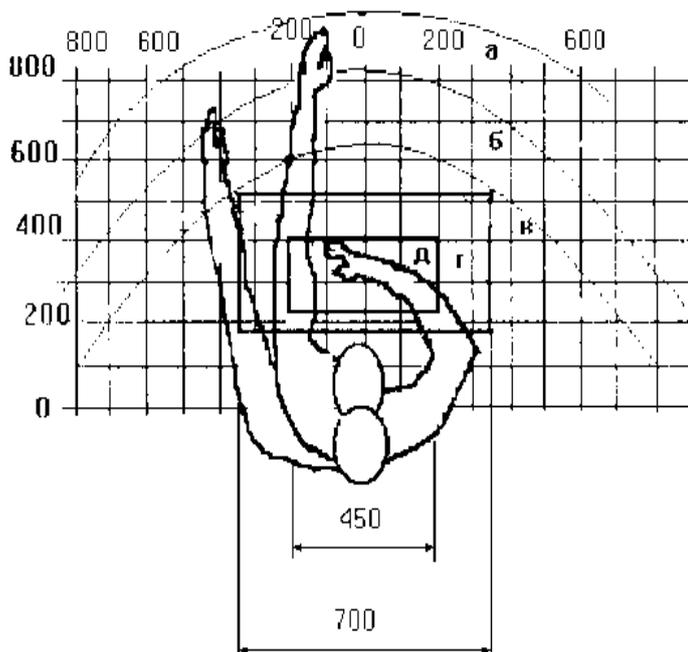


Рисунок 4.1 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: зона максимальной досягаемости рук (а); зона досягаемости пальцев при вытянутой руке (б); зона легкой досягаемости ладони (в); оптимальное пространство для грубой ручной работы (г); оптимальное пространство для тонкой ручной работы (д)

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

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

При выборе рабочего места, а именно письменного стола должны быть учтены следующие требования, которые представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Требования к оснащению рабочего места, предусматривающего длительную работу за ПК

Ширина рабочего стола	От 80 до 140 см
Высота рабочего стола	75 см
Глубина рабочего стола	От 60 до 80 см
Расстояние от глаз до монитора	От 50 до 60 см
Расстояние клавиатуры от края стола	От 10 до 30 см
Сидение	Должно позволять регулировку по высоте, повороту и углу наклона спинки (регулировки должны быть независимыми друг от друга)
Пространство для ног	Ширина от 30 см, глубина – от 40 см, с углом наклона до 20 градусов

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране. Также должна предусматриваться возможность регулировки экрана монитора:

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

В случае если работа оператора предполагает однообразную умственную работу, которая требует значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, то лучше всего выбирать неяркие, малоконтрастные цветовые оттенки (слабонасыщенные оттенки холодного голубого или зеленого цветов), которые не ослабляют внимание. Если работа требует большой умственной и физической напряженности, тогда следует использовать более теплые оттенки, которые способствуют повышению концентрации внимания.

## 4.2 Производственная безопасность

### 4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

Производственные условия на месте выполнения работы характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые по природе возникновения делятся на следующие группы:

- физические;
- химические;
- психофизиологические;
- биологические.

Опасные и вредные факторы, которые могут воздействовать на персонал при работе на ПЭВМ, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Этапы работ		Нормативные документы
	Разработка модели	Применение модели	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
Повышенный уровень электромагнитного излучения	+	+	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
Превышение уровня шума	+	+	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки
Психофизиологические факторы	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
Поражение электрическим током	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

К психологически вредным факторам, воздействующим на персонал, можно отнести:

- нервно - эмоциональные перегрузки;
- умственное напряжение;
- физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы отсутствуют.

#### **4.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов**

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03) они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup>.

##### **4.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата**

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

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

Отклонение показателей микроклимата от нормы не вызывает повреждений или нарушений состояния здоровья, но может приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажностью воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

#### 4.2.2.2 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. ПЭВМ продуцируют статические электрические поля и переменные электрические и магнитные поля разных частот. Однако, жидкокристаллические мониторы ноутбуков не создают значительные электрические и магнитные поля. Статическое поле вокруг монитора сопоставимо с нормальным фоновым уровнем в доме или на рабочем месте. Если человек работает на правильном расстоянии от монитора, уровень индукции переменного магнитного поля обычно ниже 0,7 мкТл. Сила переменных электрических полей при работе на том же расстоянии от монитора находится в интервале от менее 1 В/м до 10 В/м. Эти значения входят в допустимый порог строгих санитарных норм электромагнитного излучения, представленных в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

#### **4.2.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

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

По нормативам (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий) освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться:

- системой общего равномерного освещения.

В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы:

- комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;

- местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

#### 4.2.2.4 Превышение уровня шума

Шум, являясь общебиологическим раздражителем, оказывает влияние не только на слуховой анализатор, но действует на структуры головного мозга, вызывая сдвиги в различных функциональных системах организма. Среди многочисленных проявлений неблагоприятного воздействия шума на организм человека выделяются: снижение разборчивости речи, неприятные ощущения, развитие утомления и снижение производительности труда, появление шумовой патологии. В нашем случае источником шума является кулер ноутбука. Уровень шума кулера исправного современного ноутбука находится в пределах от 35 до 50 дБА, что входит в нормативный диапазон. В таблице 4.5 приведены нормы уровня шума при различных видах работ.

Таблица 4.5 – Нормативы уровня шума при различных видах работ

	Максимально допустимый уровень шума (дБ), в полосах следующих октав (Гц)									Эквивалентные уровни шума, дБА
	86	71	61	54	49	45	42	40	38	
Научная работа, расчеты, конструирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Офисы, лаборатории	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60

#### 4.2.2.5 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 непромышленной 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 функциональных на активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха (СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»).

#### **4.2.2.6 Поражение электрическим током**

Рабочее помещение по опасности поражения электрическим током можно отнести ко 2 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности из-за возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

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

Степень опасного воздействия электрического тока на организм человека зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;

- пути прохождения тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека;
- условий внешней среды.

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

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

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

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

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

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения (ГОСТ Р 12.1.019-2017);
- использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год.

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

#### **4.3 Экологическая безопасность**

В работе проводится дополнение теории и разрабатываются методы моделирования спектров когерентного излучения от плоских металлических мишеней на основе последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительности. При этом используется ПЭВМ – ноутбук Acer TrevelMate P259.

Влияние эксплуатации оборудования на окружающую среду минимально. Наибольший вред от них в работе – потребление электроэнергии. ПЭВМ не производят выбросов вредных веществ, не создают излучения, способного нарушить экологическую безопасность природы. Однако их производство и утилизация составляют серьезную проблему. Так, при производстве ПЭВМ используются тяжелые, щелочноземельные металлы, ртуть, пластик и стекло, что без должной утилизации по окончании службы попадает в природу и остается в не переработанном виде от века до полутора тысяч лет. Правильная утилизация ПЭВМ, а также их комплектующих позволит соблюсти нормы экологической безопасности.

Снижение уровня загрязнения окружающей среды возможно за счёт более эффективного и экономного использования электроэнергии самими

потребителями. Это использование более экономичного оборудования, а также эффективного режима загрузки этого оборудования. Сюда также включается и соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии.

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением, ответственно относиться к утилизации различных устройств, т.к. они могут разлагаться в окружающей среде от десятков до сотен лет.

#### **4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

##### **4.4.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования**

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка, сложившаяся на определенной территории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнём .

К причинам электрического характера относятся:

- короткое замыкание;
- перегрузка проводов;
- искрение;
- статическое электричество.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции.

Причины возникновения короткого замыкания:

- ошибки при проектировании;
- старение изоляции;
- увлажнение изоляции;
- механические перегрузки.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение.

#### **4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС**

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, т. к. в помещениях, имеющих оргтехнику, содержится большое количество пластиковых веществ, выделяющих при горении летучие ядовитые вещества и едкий дым;
- 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.

Существует порядок действий и правила поведения в случае возникновения пожара:

- 1) Незамедлительно позвонить в пожарно-спасательную службу (101) или МЧС (112);
- 2) Поставить в известность руководство (дежурного);
- 3) По возможности принять меры для эвакуации людей и меры для тушения пожара.

#### **4.5 Выводы по разделу**

В данном разделе рассмотрены вопросы социальной ответственности, к которым относятся правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, производственная безопасность, экологическая безопасность, а также безопасность в ЧС.

В первой части раздела рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

В подразделе «Производственная безопасность» проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований, также приведены мероприятия по снижению воздействия опасных и вредных факторов на исследователя.

В подразделе «Экологическая безопасность» проведен обзор возможного влияния процесса исследования на окружающую среду, также рассмотрены меры по защите окружающей среды.

В заключительной части раздела «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» проведен анализ вероятной чрезвычайной ситуации (ЧС), которая может возникнуть на рабочем месте при проведении исследований, помимо этого приведены мероприятия по предотвращению ЧС и порядок действий при возникновении ЧС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа логически разделена на два этапа. Первый – подготовка материала для проведения моделирования спектров, второй – непосредственно само моделирование.

Первый этап в свою очередь так же был разбит на две части – формирование теоретической базы и написание кода на основе сформированной базы. Теория когерентного излучения, а именно та ее часть, что связана с таким понятием, как форм-фактор нуждалась не просто в тщательном изучении, но и некоторой доработке для дальнейшего осуществления моделирования спектров. Так, было необходимо учесть несколько новых параметров, присущих реальным последовательностям электронных сгустков, связанных в основном с неравномерностью последовательностей. В конечном итоге, большая часть параметров была включена в теорию. Нововведённых параметров оказалось достаточно для проведения моделирования реальных спектров, однако в будущем планируется также ввести параметры, оставшиеся пока не учтёнными. Написание кода для приложения-манипулятора на базе полученных теоретических формул было также успешно реализовано на основе языка Wolfram Language. В качестве альтернативы аналитическому методу расчетов спектров предложен прямой численный метод, учитывающий все параметры последовательности. Написанный для реализации метода код прошел верификацию, при сравнении с результатами моделирования спектров излучение аналитическим методом, однако, в силу того что время расчета спектров численным методом существенно превышает время расчетов аналитическим, даже после проведения оптимизации, было решено использовать его только в том случае, когда невозможно применить аналитический метод.

Второй этап был разбит на три части: поиск статей с параметрами последовательностей сверхкоротких электронных сгустков для проведения моделирования спектров излучения, непосредственно само моделирование спектров переходного излучения от найденных последовательностей с

описанием наблюдаемой картины и выявление закономерностей влияния параметров равномерных последовательностей сгустков на итоговый вид спектра излучения с выработкой рекомендаций к параметрам последовательности для получения излучения высокой интенсивности и монохроматичности. В результате получено 10 спектров от реальных последовательностей сгустков, шесть из которых являются спектрами от фемтосекундных последовательностей, а оставшиеся четыре – от аттосекундных. Большинство спектров от фемтосекундных последовательностей выглядят потенциальными источниками мягкого ТГц излучения. Спектры от аттосекундных сгустков находятся в диапазоне сотен ТГц. Приведенный во втором разделе анализ влияния параметров последовательности сгустков на вид спектра излучения позволяет сделать следующие выводы: основной вклад в то, насколько излучение будет монохроматичным, влияет количество сгустков в последовательности, на интенсивность излучения в основном влияют размеры сгустков и расстояния между ними. Остальные параметры также вносят некоторый вклад в итоговый вид спектр излучения, но не такой сильный.

### Список использованных источников

1. Гинзбург В.Л. Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую/ В.Л. Гинзбург, И.М. Франк // ЖЭТФ. – 1946. – Т. 16 – № 1. – С. 15-27.
2. Гинзбург В.Л. Переходное излучение и переходное рассеяние: Некоторые вопросы к теории / В.Л. Гинзбург, В.Н. Цытович; – М: Наука, 1984. – 360 с.
3. Коньков А. С. Характеристики поляризационного излучения заряженных частиц и магнитных моментов: дис. ... канд. физ.-мат. наук – Томск, 2015. – 134 с.
4. Дифракционное излучение релятивистских частиц: учеб. пособие / А.П. Потылицын, М.И. Рязанов, М.Н. Стриханов, А.А. Тищенко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. - 347 с.
5. [Электронный ресурс] // European XFEL – 2017. – Режим доступа: [https://www.xfel.eu/e35178/e56171/e56378/xfel\\_file79748/FB\\_XFEL\\_Enlightening-Science\\_RU\\_eng.pdf](https://www.xfel.eu/e35178/e56171/e56378/xfel_file79748/FB_XFEL_Enlightening-Science_RU_eng.pdf), свободный (дата обращения 10.06.2020).
6. Науменко Г.А. Форм-факторы релятивистских электронных сгустков в когерентном излучении / Г.А. Науменко // Изв. вузов. Физика. – 2007 – Т. 50. – 10/3 –С. 199-206.
7. Трясучев В.А. Квантовая механика для студентов технических вузов: учеб. пособие / В.А. Трясучев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017 – 156 с.
8. Потылицын А.П. Пространственная когерентность в переходном излучении коротких электронных сгустков / А.П. Потылицын // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 103 – № 11. – С. 762-766.
9. [Электронный ресурс] // Wolfram Mathematica: Современные технические вычисления – Режим доступа: <https://www.wolfram.com/mathematica/>, свободный (дата обращения 10.06.2020).
10. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – 4-е изд. – М.: Наука, 1963. – 1100 с.

11. Тищенко А.А. Некогерентный форм-фактор в дифракционном излучении и излучении Смита–Парселла / А.А. Тищенко, Д.Ю. Сергеева // Письма в ЖЭТФ. – 2019. – Т. 110. – № 10. – С. 636 – 644
12. [Электронный ресурс] // Using ASTRA at DESY-Hamburg – Режим доступа: <https://www.desy.de/~mpyflo/>, свободный (дата обращения 10.06.2020).
13. [Электронный ресурс] // Поддержка по продуктам | Асер Россия – Режим доступа: <https://www.acer.com/ac/ru/RU/content/support-product/6883?b=1>, свободный (дата обращения 10.06.2020).
14. Z. Ma et al. Generating quasi-single-cycle THz pulse from frequency-chirped electron bunch train and a tapered undulator // High Power Laser Science and Engineering. – 2016. – Vol. 4. – p. E1.
15. J Lim et al. Terahertz-optical intensity grating for creating high-charge, attosecond electron bunches // New J. Phys. – 2019. – Vol. 21 – p. 033020
16. Z. Zhang et al. Tunable High-Intensity Electron Bunch Train Production Based on Nonlinear Longitudinal Space Charge Oscillation // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 116. – p. 184801.
17. L. Yan et al. UV pulse trains by  $\alpha$ -BBO crystal stacking for the production of THz-rap-rate electron bunches // J. Plasma Physics. – 2012. – Vol. 78. – pp. 429-431.
18. Christopher M. S. Sears et al. Production and characterization of attosecond electron bunch trains // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2008. – Vol. 11. – p. 061301.
19. Kimura W.D. et al. Subpicosecond Double Electron Bunch Generation // AIP Conference Proceedings. – 2006. – Vol. 877. – pp. 527-533.
20. M. Shevelev et al. Generation of a femtosecond electron microbunch train from a photocathode using twofold Michelson interferometer // Phys. Rev. Accel. Beams. – 2017. – Vol. 20. – p. 103401.

21. Norbert Schöenberger et al. Generation and Characterization of Attosecond Microbunched Electron Pulse Trains via Dielectric Laser Acceleration // *Phys. Rev. Lett.* – 2019. – Vol. 123. – p. 264803.
22. E. A. Nanni et al. Nanomodulated electron beams via electron diffraction and emittance exchange for coherent x-ray generation // *Phys. Rev. Accel. Beams.* – 2018. – Vol. 21. – p. 014401.
23. Christopher M. S. Sears et al. Production and characterization of attosecond electron bunch trains // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* – 2008. – Vol. 11. – p. 061301.
24. [Электронный ресурс] // Google – Режим доступа: <https://www.google.com/>, свободный (дата обращения 10.06.2020).
25. [Электронный ресурс] // Sci-Hub: устраняя преграды на пути распространения знаний. – Режим доступа: <https://sci-hub.st/>, свободный (дата обращения 10.06.2020).
26. Денисов П.И. Переходное излучение / П.И. Денисов // *Соросовский образовательный журнал.* – 1997. – № 3. – С. 124-129.
27. V.A. Verzilov Transition radiation in the pre-wave zone // *Physics Letters A.* – 2000. – Vol. 11 (1-2). – pp. 135-140.
28. [Электронный ресурс] // Digitize graphs and plots – GetData Graph Digitizer – graphs digitizing software – Режим доступа: <http://getdata-graph-digitizer.com/>, свободный (дата обращения 10.06.2020).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

```

Manipulate[Graphics3D[
  (*Оси*)
  Black,Arrowheads[0.02],
  {Thickness[0.002],Arrow[Tube[{{0,0,0},{2.5,0,0}}]}},
  {Thickness[0.002],Arrow[Tube[{{0,0,0},{0,2.5,0}}]}},
  {Thickness[0.002],Arrow[Tube[{{0,0,0},{0,0,2.5}}]}},
  (*Подписи осей*)
  Text[Style["X",Large,25],{2.7,0,0}],
  Text[Style["Y",Large,25],{0,2.7,0}],
  Text[Style["Z",Large,25],{0,0,2.7}],
  (*Волновой вектор1*)
  {Red,Thickness[0.003],Arrowheads[.03],Arrow[Tube[{{0,0,0},1{Cos[Theta]y}*Cos[Theta]x,
  Cos[Theta]y}*Sin[Theta]x,Sin[Theta]y}}]}},
  Text[Style[
    "Overscript[k,
    \[RightVector]]",Red,Large,Italic,25],1{Cos[Theta]y}*Cos[Theta]x+0.3,Cos[Theta]y*Sin[Theta]x,
  Sin[Theta]y}],
  (*Волновой вектор2*)
  {Red,Thickness[0.003],Arrowheads[.03],Arrow[Tube[{{x,y,x/Tan[Theta]0},1*Cos[Theta]y*Cos[Theta]x+x,
  1*Cos[Theta]y*Sin[Theta]x+y,1*Sin[Theta]y+x/Tan[Theta]0}}]}},
  Text[Style[
    "Overscript[k,
    \[RightVector]]",Red,Large,Italic,25],{1*Cos[Theta]y*Cos[Theta]x+x+0.3,1*Cos[Theta]y*Sin[Theta]x+y,
  1*Sin[Theta]y+x/Tan[Theta]0}],
  (*Мишень*)
  Rotate[{Opacity[0.5],Blue,Parallelepiped[{-2,2,0},{{4,0,0},{0,-4,0}}]},\[Theta]0-90 \[Degree],{0,1,0}],
  (*Сгусток1*)
  {Red,Ellipsoid[{0,0,-1.5},{0.05,0.05,0.1}]},
  {Red,Dashed,Thickness[0.002],Line[{{0,0,-1.5},{0,0,0}}]},
  Text[Style["e^-",Red,Large,Italic,25],{0.3,0,-1.5}],
  (*Сгусток2*)
  {Red,Ellipsoid[{x,y,-2.5},{0.05,0.05,0.1}]},
  {Red,Dashed,Thickness[0.002],Line[{{x,y,-2.5},{x,y,x/Tan[Theta]0}}]}},
  Text[Style["e^-",Red,Large,Italic,25],{x+0.3,y,-2.5}],
  (*Линии*)
  {Thickness[0.004],Arrow[{{0,0,0},{x,y,x/Tan[Theta]0}}]},
  {Thickness[0.008],Darker[Darker[Green]],Line[{{x,y,x/Tan[Theta]0},{(Cos[Theta]y (-Cos[Theta]x (y Cos[Theta]y Sin[Theta]x+x Cot[Theta]0 Sin[Theta]y)+x (Cos[Theta]y Sin[Theta]x)^2+Sin[Theta]y Tan[Theta]y))},(Cos[Theta]x Cos[Theta]y^2 (y Cos[Theta]x-x Sin[Theta]x)-x Cos[Theta]y Cot[Theta]0 Sin[Theta]x Sin[Theta]y+y

```

```

Sin[\[Theta]y]^2), (Cos[\[Theta]y] (x Cos[\[Theta]y] Cot[\[Theta]0]-
Cos[\[Theta]x] Sin[\[Theta]y] (x+y Tan[\[Theta]x])))}}}],
{Thickness[0.008], Darker[Green], Line[{{0, 0, 0}, -(Cos[\[Theta]y] (-
Cos[\[Theta]x] (y Cos[\[Theta]y] Sin[\[Theta]x]+x Cot[\[Theta]0]
Sin[\[Theta]y))+x (Cos[\[Theta]y] Sin[\[Theta]x]^2+Sin[\[Theta]y]
Tan[\[Theta]y])))-x, (Cos[\[Theta]x] Cos[\[Theta]y]^2 (y Cos[\[Theta]x]-x
Sin[\[Theta]x))-x Cos[\[Theta]y] Cot[\[Theta]0] Sin[\[Theta]x] Sin[\[Theta]y]+y
Sin[\[Theta]y]^2)-y, (Cos[\[Theta]y] (x Cos[\[Theta]y] Cot[\[Theta]0]-
Cos[\[Theta]x] Sin[\[Theta]y] (x+y Tan[\[Theta]x]))))-x/Tan[\[Theta]0]}}}],
{Dashed, Thickness[0.004], Line[{{0, 0, 0}, (Cos[\[Theta]y] (-Cos[\[Theta]x] (y
Cos[\[Theta]y] Sin[\[Theta]x]+x Cot[\[Theta]0] Sin[\[Theta]y))+x (Cos[\[Theta]y]
Sin[\[Theta]x]^2+Sin[\[Theta]y] Tan[\[Theta]y]))), (Cos[\[Theta]x]
Cos[\[Theta]y]^2 (y Cos[\[Theta]x]-x Sin[\[Theta]x))-x Cos[\[Theta]y]
Cot[\[Theta]0] Sin[\[Theta]x] Sin[\[Theta]y]+y Sin[\[Theta]y]^2), (Cos[\[Theta]y]
(x Cos[\[Theta]y] Cot[\[Theta]0]-Cos[\[Theta]x] Sin[\[Theta]y] (x+y
Tan[\[Theta]x])))}}}],
{Dashed, Thickness[0.004], Line[{-((Cos[\[Theta]y] (-Cos[\[Theta]x] (y
Cos[\[Theta]y] Sin[\[Theta]x]+x Cot[\[Theta]0] Sin[\[Theta]y))+x (Cos[\[Theta]y]
Sin[\[Theta]x]^2+Sin[\[Theta]y] Tan[\[Theta]y))))-x, (Cos[\[Theta]x]
Cos[\[Theta]y]^2 (y Cos[\[Theta]x]-x Sin[\[Theta]x))-x Cos[\[Theta]y]
Cot[\[Theta]0] Sin[\[Theta]x] Sin[\[Theta]y]+y Sin[\[Theta]y]^2)-
y, (Cos[\[Theta]y] (x Cos[\[Theta]y] Cot[\[Theta]0]-Cos[\[Theta]x] Sin[\[Theta]y]
(x+y Tan[\[Theta]x]))))-x/Tan[\[Theta]0]}, {x, y, x/Tan[\[Theta]0]}}}],
Text[Style["Overscript[r,
\[RightVector]"], Black, Bold, Large, Italic, 25], {x/2, y/2+0.3, x/(2 Tan[\[Theta]0])-
0.2}],
{Blue, Thickness[0.002], BezierCurve[{{0, 0, -1}, {-0.4, 0, -1.3}, {-Tan[\[Theta]0], 0, -
1}}}],
Rotate[{Blue, Thickness[0.003], Line[{{0, 0, 0}, {0, 0, -2}}]}, \[Theta]0, {0, 1, 0}],
Text[Style["Subscript[\[Theta], 0"], Blue, Bold, Large, Italic, 23], {-0.4, 0, -1.4
}],
ImageSize->{500, 500}, PlotRange->{{-3, 3}, {-3, 3}, {-3, 3}}, Boxed->False,
-x Cos[\[Theta]x] Cos[\[Theta]y]-y Cos[\[Theta]y] Sin[\[Theta]x]-x
Cot[\[Theta]0] Sin[\[Theta]y]},
{{x, 0.5}, 0, 3},
{{y, 1.5}, 0, 3},
{{\[Theta]0, 30 \[Degree]}, 0, 90 \[Degree]},
{{\[Theta]y, 30 \[Degree]}, 0, 360 \[Degree]},
{{\[Theta]x, 30 \[Degree]}, 0, 360 \[Degree]},
{{1, 2}, 1, 3}]

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

```

c1=0.3;
F1[m_, \[Lambda]_, ee_, \[Theta]0_,
\[Theta]y_, \[Theta]x_, \[Sigma]x1_, \[Sigma]y1_, \[Sigma]z1_, \[Sigma]x2_, \[Sigma]y2
_, \[Sigma]z2_, \[Sigma]x3_, \[Sigma]y3_, \[Sigma]z3_, \[Sigma]x4_, \[Sigma]y4_, \[Sigma]
a]z4_, \[Sigma]x5_, \[Sigma]y5_, \[Sigma]z5_, \[Sigma]x6_, \[Sigma]y6_, \[Sigma]z6_, \[
Sigma]x7_, \[Sigma]y7_, \[Sigma]z7_, \[Sigma]x8_, \[Sigma]y8_, \[Sigma]z8_, \[Sigma]x9
_, \[Sigma]y9_, \[Sigma]z9_, \[Sigma]x10_, \[Sigma]y10_, \[Sigma]z10_, x01_, y01_, z01_,
x02_, y02_, z02_, x03_, y03_, z03_, x04_, y04_, z04_, x05_, y05_, z05_, x06_, y06_, z06_, x07_,
y07_, z07_, x08_, y08_, z08_, x09_, y09_, z09_, x010_, y010_, z010_, \[Mu]1_, \[Mu]2_, \[Mu]3
_, \[Mu]4_, \[Mu]5_, \[Mu]6_, \[Mu]7_, \[Mu]8_, \[Mu]9_, \[Mu]10_] :=
Module[{\[Nu], \[Beta], a, b, c, \[Sigma], cor0, \[Mu]},

\[Sigma]={{\[Sigma]x1, \[Sigma]y1, \[Sigma]z1}, {\[Sigma]x2, \[Sigma]y2, \[Sigma]z2},
{\[Sigma]x3, \[Sigma]y3, \[Sigma]z3}, {\[Sigma]x4, \[Sigma]y4, \[Sigma]z4}, {\[Sigma]x5,
\[Sigma]y5, \[Sigma]z5}, {\[Sigma]x6, \[Sigma]y6, \[Sigma]z6}, {\[Sigma]x7, \[Sigma]
y7, \[Sigma]z7}, {\[Sigma]x8, \[Sigma]y8, \[Sigma]z8}, {\[Sigma]x9, \[Sigma]y9, \[Sigma]
]z9}, {\[Sigma]x10, \[Sigma]y10, \[Sigma]z10}};
cor0={{x01, y01, z01}, {x02, y02, z02}, {x03, y03, z03}, {x04, y04, z04}, {x05, y05, z05}, {x06
, y06, z06}, {x07, y07, z07}, {x08, y08, z08}, {x09, y09, z09}, {x010, y010, z010}};
\[Mu]={{\[Mu]1, \[Mu]2, \[Mu]3, \[Mu]4, \[Mu]5, \[Mu]6, \[Mu]7, \[Mu]8, \[Mu]9, \[Mu]10}};
a=0;
b=0;
c=1/\[Beta];
\[Beta]=0.32 (*Sqrt[1-(0.511)^2/ee^2]*);
\[Lambda]=c1/\[Nu];
(Abs[Total[\[Mu][[#]]Exp[-((2\[Pi]^2)/\[Lambda]^2) (\[Sigma][[#]][[1]]^2
a^2+\[Sigma][[#]][[2]]^2 b^2+\[Sigma][[#]][[3]]^2 c^2)]Exp[-I (2\[Pi])/\[Lambda]
(cor0[[#]][[1]]a+cor0[[#]][[2]]b+cor0[[#]][[3]]c)]&/@Range[m]])^2
c1=0.3;
F[m_, \[Lambda]_, ee_, \[Theta]0_,
\[Theta]y_, \[Theta]x_, \[Sigma]x1_, \[Sigma]y1_, \[Sigma]z1_, \[Sigma]x2_, \[Sigma]y2
_, \[Sigma]z2_, \[Sigma]x3_, \[Sigma]y3_, \[Sigma]z3_, \[Sigma]x4_, \[Sigma]y4_, \[Sigma]
a]z4_, \[Sigma]x5_, \[Sigma]y5_, \[Sigma]z5_, \[Sigma]x6_, \[Sigma]y6_, \[Sigma]z6_, \[
Sigma]x7_, \[Sigma]y7_, \[Sigma]z7_, \[Sigma]x8_, \[Sigma]y8_, \[Sigma]z8_, \[Sigma]x9
_, \[Sigma]y9_, \[Sigma]z9_, \[Sigma]x10_, \[Sigma]y10_, \[Sigma]z10_, x01_, y01_, z01_,
x02_, y02_, z02_, x03_, y03_, z03_, x04_, y04_, z04_, x05_, y05_, z05_, x06_, y06_, z06_, x07_,
y07_, z07_, x08_, y08_, z08_, x09_, y09_, z09_, x010_, y010_, z010_, \[Mu]1_, \[Mu]2_, \[Mu]3
_, \[Mu]4_, \[Mu]5_, \[Mu]6_, \[Mu]7_, \[Mu]8_, \[Mu]9_, \[Mu]10_] :=
Module[{\[Nu], \[Beta], a, b, c, \[Sigma], cor0, \[Mu]},

```

```

\[Sigma]={{\[Sigma]x1,\[Sigma]y1,\[Sigma]z1},{\[Sigma]x2,\[Sigma]y2,\[Sigma]z2},
{\[Sigma]x3,\[Sigma]y3,\[Sigma]z3},{\[Sigma]x4,\[Sigma]y4,\[Sigma]z4},{\[Sigma]x
5,\[Sigma]y5,\[Sigma]z5},{\[Sigma]x6,\[Sigma]y6,\[Sigma]z6},{\[Sigma]x7,\[Sigma]
y7,\[Sigma]z7},{\[Sigma]x8,\[Sigma]y8,\[Sigma]z8},{\[Sigma]x9,\[Sigma]y9,\[Sigma]
z9},{\[Sigma]x10,\[Sigma]y10,\[Sigma]z10}};
cor0={{x01,y01,z01},{x02,y02,z02},{x03,y03,z03},{x04,y04,z04},{x05,y05,z05},{x06
,y06,z06},{x07,y07,z07},{x08,y08,z08},{x09,y09,z09},{x010,y010,z010}};
\[Mu]={{[Mu]1,[Mu]2,[Mu]3,[Mu]4,[Mu]5,[Mu]6,[Mu]7,[Mu]8,[Mu]9,[Mu]10}};
a=-Cos\[Theta]xCos\[Theta]y-(Sin\[Theta]y-1/\[Beta])/Tan\[Theta]0;
b=-Cos\[Theta]ySin\[Theta]x;
c=-(1/\[Beta]);
\[Beta]=Sqrt[1-(0.511)^2/ee^2];
\[Lambda]=c1/\[Nu];
(Abs[Total\[Mu][[#]]Exp[-((2\[Pi]^2)/\[Lambda]^2)(\[Sigma][[#])[1]^2
a^2+\[Sigma][[#])[2]^2 b^2+\[Sigma][[#])[3]^2 c^2]Exp[-I (2\[Pi])/\[Lambda]
(cor0[#[#])[1]a+cor0[#[#])[2]b+cor0[#[#])[3]c)]&/@Range[m]])^2
trainDistribution3D[m_,l_,\[Sigma]x1_,\[Sigma]y1_,\[Sigma]z1_,\[Sigma]x2_,\[Sigma]
y2_,\[Sigma]z2_,\[Sigma]x3_,\[Sigma]y3_,\[Sigma]z3_,\[Sigma]x4_,\[Sigma]y4_,\[Sigma]
z4_,\[Sigma]x5_,\[Sigma]y5_,\[Sigma]z5_,\[Sigma]x6_,\[Sigma]y6_,\[Sigma]z6
_,\[Sigma]x7_,\[Sigma]y7_,\[Sigma]z7_,\[Sigma]x8_,\[Sigma]y8_,\[Sigma]z8_,\[Sigma]
y9_,\[Sigma]z9_,\[Sigma]x10_,\[Sigma]y10_,\[Sigma]z10_,x01_,y01_,z
01_,x02_,y02_,z02_,x03_,y03_,z03_,x04_,y04_,z04_,x05_,y05_,z05_,x06_,y06_,z06_,x
07_,y07_,z07_,x08_,y08_,z08_,x09_,y09_,z09_,x010_,y010_,z010_]:=
Module[{\[Sigma],cor0},
\[Sigma]={{\[Sigma]x1,\[Sigma]y1,\[Sigma]z1},{\[Sigma]x2,\[Sigma]y2,\[Sigma]z2},
{\[Sigma]x3,\[Sigma]y3,\[Sigma]z3},{\[Sigma]x4,\[Sigma]y4,\[Sigma]z4},{\[Sigma]x
5,\[Sigma]y5,\[Sigma]z5},{\[Sigma]x6,\[Sigma]y6,\[Sigma]z6},{\[Sigma]x7,\[Sigma]
y7,\[Sigma]z7},{\[Sigma]x8,\[Sigma]y8,\[Sigma]z8},{\[Sigma]x9,\[Sigma]y9,\[Sigma]
z9},{\[Sigma]x10,\[Sigma]y10,\[Sigma]z10}};
cor0={{x01,y01,z01},{x02,y02,z02},{x03,y03,z03},{x04,y04,z04},{x05,y05,z05},{x06
,y06,z06},{x07,y07,z07},{x08,y08,z08},{x09,y09,z09},{x010,y010,z010}};
Ellipsoid[{cor0[#[#])[1],cor0[#[#])[2],-
cor0[#[#])[3]+1},{3\[Sigma][[#])[1],3\[Sigma][[#])[2],3\[Sigma][[#])[3]]]
&/@Range[m]]
trainDistribution3D1[m_,k_,l_,\[Sigma]x1_,\[Sigma]y1_,\[Sigma]z1_,\[Sigma]x2_,\[Sigma]
y2_,\[Sigma]z2_,\[Sigma]x3_,\[Sigma]y3_,\[Sigma]z3_,\[Sigma]x4_,\[Sigma]y4
_,\[Sigma]z4_,\[Sigma]x5_,\[Sigma]y5_,\[Sigma]z5_,\[Sigma]x6_,\[Sigma]y6_,\[Sigma]
z6_,\[Sigma]x7_,\[Sigma]y7_,\[Sigma]z7_,\[Sigma]x8_,\[Sigma]y8_,\[Sigma]z8_,\[Sigma]
x9_,\[Sigma]y9_,\[Sigma]z9_,\[Sigma]x10_,\[Sigma]y10_,\[Sigma]z10_,x01_,y0
1_,z01_,x02_,y02_,z02_,x03_,y03_,z03_,x04_,y04_,z04_,x05_,y05_,z05_,x06_,y06_,z0
6_,x07_,y07_,z07_,x08_,y08_,z08_,x09_,y09_,z09_,x010_,y010_,z010_,\[Mu]1_,\[Mu]2
_,\[Mu]3_,\[Mu]4_,\[Mu]5_,\[Mu]6_,\[Mu]7_,\[Mu]8_,\[Mu]9_,\[Mu]10_]:=

```

```

Module[{gaussDistribution1bunch, \[Sigma], cor0, \[Mu]},
\[Sigma]={{\[Sigma]x1, \[Sigma]y1, \[Sigma]z1}, {\[Sigma]x2, \[Sigma]y2, \[Sigma]z2},
{\[Sigma]x3, \[Sigma]y3, \[Sigma]z3}, {\[Sigma]x4, \[Sigma]y4, \[Sigma]z4}, {\[Sigma]x
5, \[Sigma]y5, \[Sigma]z5}, {\[Sigma]x6, \[Sigma]y6, \[Sigma]z6}, {\[Sigma]x7, \[Sigma]
y7, \[Sigma]z7}, {\[Sigma]x8, \[Sigma]y8, \[Sigma]z8}, {\[Sigma]x9, \[Sigma]y9, \[Sigma]
z9}, {\[Sigma]x10, \[Sigma]y10, \[Sigma]z10}};
cor0={{x01, y01, z01}, {x02, y02, z02}, {x03, y03, z03}, {x04, y04, z04}, {x05, y05, z05}, {x06
, y06, z06}, {x07, y07, z07}, {x08, y08, z08}, {x09, y09, z09}, {x010, y010, z010}};
\[Mu]={{\[Mu]1, \[Mu]2, \[Mu]3, \[Mu]4, \[Mu]5, \[Mu]6, \[Mu]7, \[Mu]8, \[Mu]9, \[Mu]10}};
gaussDistribution1bunch=MultinormalDistribution[{cor0[[#]][[1]], cor0[[#]][[2]], -
cor0[[#]][[3]]+1}, {{\[Sigma][[#]][[1]]^2, 0, 0}, {0, \[Sigma][[#]][[2]]^2, 0}, {0, 0, \[
Sigma][[#]][[3]]^2}}]&;
RandomReal[gaussDistribution1bunch[#], IntegerPart[k*\[Mu][[#]]]&/@Range[m]]
Framed[Manipulate[
Quiet[Grid@{{If[q=="\u03a0",
If[t=="F(\[Lambda])",
Labeled[Plot[F[m, \[Lambda], ee, \[Theta]0 \[Degree], \[Theta]y \[Degree], \[Theta]x
\[Degree], \[Sigma]x1, \[Sigma]y1, \[Sigma]z1, \[Sigma]x2, \[Sigma]y2, \[Sigma]z2, \[Si
gma]x3, \[Sigma]y3, \[Sigma]z3, \[Sigma]x4, \[Sigma]y4, \[Sigma]z4, \[Sigma]x5, \[Sigma]
y5, \[Sigma]z5, \[Sigma]x6, \[Sigma]y6, \[Sigma]z6, \[Sigma]x7, \[Sigma]y7, \[Sigma]z7
, \[Sigma]x8, \[Sigma]y8, \[Sigma]z8, \[Sigma]x9, \[Sigma]y9, \[Sigma]z9, \[Sigma]x10, \[
Sigma]y10, \[Sigma]z10, x01, y01, z01, x02, y02, z02, x03, y03, z03, x04, y04, z04, x05, y05, z
05, x06, y06, z06, x07, y07, z07, x08, y08, z08, x09, y09, z09, x010, y010, z010, \[Mu]1, \[Mu]2,
\[Mu]3, \[Mu]4, \[Mu]5, \[Mu]6, \[Mu]7, \[Mu]8, \[Mu]9, \[Mu]10}, {\[Lambda], \[Lambda]mi
n, \[Lambda]max},
Frame->True, FrameLabel->{"\[Lambda], мм", "F(\[Lambda]), отн. ед."},
PlotStyle->{Thickness[.0035], Red}, PlotRange->{0, 1},
ImageSize->{600, 500}, AxesStyle->{{Black, Thick}, {Black, Thick}},
LabelStyle->{Large, Black, FontFamily->"Times"},
PlotPoints->pp, MaxRecursion->mr, ImagePadding->All],
"Форм фактор в зависимости от длины волны излучения", Top, LabelStyle-
>{Large, Black, FontFamily->"Times"}],
Labeled[Plot[F[m, c1/\[Nu], ee, \[Theta]0 \[Degree], \[Theta]y \[Degree], \[Theta]x
\[Degree], \[Sigma]x1, \[Sigma]y1, \[Sigma]z1, \[Sigma]x2, \[Sigma]y2, \[Sigma]z2, \[Si
gma]x3, \[Sigma]y3, \[Sigma]z3, \[Sigma]x4, \[Sigma]y4, \[Sigma]z4, \[Sigma]x5, \[Sigma]
y5, \[Sigma]z5, \[Sigma]x6, \[Sigma]y6, \[Sigma]z6, \[Sigma]x7, \[Sigma]y7, \[Sigma]z7
, \[Sigma]x8, \[Sigma]y8, \[Sigma]z8, \[Sigma]x9, \[Sigma]y9, \[Sigma]z9, \[Sigma]x10, \[
Sigma]y10, \[Sigma]z10, x01, y01, z01, x02, y02, z02, x03, y03, z03, x04, y04, z04, x05, y05, z
05, x06, y06, z06, x07, y07, z07, x08, y08, z08, x09, y09, z09, x010, y010, z010, \[Mu]1, \[Mu]2,
\[Mu]3, \[Mu]4, \[Mu]5, \[Mu]6, \[Mu]7, \[Mu]8, \[Mu]9, \[Mu]10}, {\[Nu], \[Nu]min, \[Nu]m
ax},
Frame->True, FrameLabel->{"\[Nu], ТГц", "F(\[Nu]), отн. ед."},

```

```

PlotStyle->{Thickness[.0035],Red},PlotRange->{0,1},
ImageSize->{600,500},AxesStyle->{{Black,Thick},{Black,Thick}},
LabelStyle->{Large,Black,FontFamily->"Times"},
PlotPoints->pp,MaxRecursion->mr,ImagePadding->All],
"Форм фактор в зависимости от частоты излучения",Top,LabelStyle-
>{Large,Black,FontFamily->"Times"}]],
If[t=="F(\[Lambda])",
Labeled[Plot[F1[m,\[Lambda],ee,\[Theta]0 \[Degree], \[Theta]y
\[Degree],\[Theta]x
\[Degree],\[Sigma]x1,\[Sigma]y1,\[Sigma]z1,\[Sigma]x2,\[Sigma]y2,\[Sigma]z2,\[Si
gma]x3,\[Sigma]y3,\[Sigma]z3,\[Sigma]x4,\[Sigma]y4,\[Sigma]z4,\[Sigma]x5,\[Sigma
]y5,\[Sigma]z5,\[Sigma]x6,\[Sigma]y6,\[Sigma]z6,\[Sigma]x7,\[Sigma]y7,\[Sigma]z7
,\[Sigma]x8,\[Sigma]y8,\[Sigma]z8,\[Sigma]x9,\[Sigma]y9,\[Sigma]z9,\[Sigma]x10,\[
Sigma]y10,\[Sigma]z10,x01,y01,z01,x02,y02,z02,x03,y03,z03,x04,y04,z04,x05,y05,z
05,x06,y06,z06,x07,y07,z07,x08,y08,z08,x09,y09,z09,x010,y010,z010,\[Mu]1,\[Mu]2,
\[Mu]3,\[Mu]4,\[Mu]5,\[Mu]6,\[Mu]7,\[Mu]8,\[Mu]9,\[Mu]10},{\[Lambda],\[Lambda]mi
n,\[Lambda]max},
Frame->True,FrameLabel->{"\[Lambda], мм","F(\[Lambda]), отн. ед."},
PlotStyle->{Thickness[.0035],Red},PlotRange->{0,1},
ImageSize->{600,500},AxesStyle->{{Black,Thick},{Black,Thick}},
LabelStyle->{Large,Black,FontFamily->"Times"},
PlotPoints->pp,MaxRecursion->mr,ImagePadding->All],
"Форм фактор в зависимости от длины волны излучения",Top,LabelStyle-
>{Large,Black,FontFamily->"Times"}]],
Labeled[Plot[F1[m,c1/\[Nu],ee,\[Theta]0 \[Degree], \[Theta]y \[Degree],\[Theta]x
\[Degree],\[Sigma]x1,\[Sigma]y1,\[Sigma]z1,\[Sigma]x2,\[Sigma]y2,\[Sigma]z2,\[Si
gma]x3,\[Sigma]y3,\[Sigma]z3,\[Sigma]x4,\[Sigma]y4,\[Sigma]z4,\[Sigma]x5,\[Sigma
]y5,\[Sigma]z5,\[Sigma]x6,\[Sigma]y6,\[Sigma]z6,\[Sigma]x7,\[Sigma]y7,\[Sigma]z7
,\[Sigma]x8,\[Sigma]y8,\[Sigma]z8,\[Sigma]x9,\[Sigma]y9,\[Sigma]z9,\[Sigma]x10,\[
Sigma]y10,\[Sigma]z10,x01,y01,z01,x02,y02,z02,x03,y03,z03,x04,y04,z04,x05,y05,z
05,x06,y06,z06,x07,y07,z07,x08,y08,z08,x09,y09,z09,x010,y010,z010,\[Mu]1,\[Mu]2,
\[Mu]3,\[Mu]4,\[Mu]5,\[Mu]6,\[Mu]7,\[Mu]8,\[Mu]9,\[Mu]10},{\[Nu],\[Nu]min,\[Nu]m
ax},
Frame->True,FrameLabel->{"\[Nu], ТГц","F(\[Nu]), отн. ед."},
PlotStyle->{Thickness[.0035],Red},PlotRange->{0,1},
ImageSize->{600,500},AxesStyle->{{Black,Thick},{Black,Thick}},
LabelStyle->{Large,Black,FontFamily->"Times"},
PlotPoints->pp,MaxRecursion->mr,ImagePadding->All],
"Форм фактор в зависимости от частоты излучения",Top,LabelStyle-
>{Large,Black,FontFamily->"Times"}]]
]],
{

```

```

Labeled[Graphics3D[{
Black,Arrowheads[Large],{Arrow[{{0,0,0},{1.5*tar1,0,0}}],
Arrow[{{0,0,0},{0,1.5*tar1,0}}],
Arrow[{{0,0,-(m+3)*tar1},{0,0,1.5*tar1}}],
Text[Style["X",Large,18],{2 *tar1,0,0}],
Text[Style["Y",Large,18],{0,2 *tar1,0}],
Text[Style["Z",Large,18],{0,0,2 *tar1}],
If[q=="ПМ",Rotate[{Green,Parallelepiped[{-tar1,-
tar1,0},{2*tar1,0,0},{0,2*tar1,0}}],(90-[Theta]0) \[Degree],{0,-1,0}],
Rotate[Rotate[{Yellow,Polygon[{{r,0.2tar1,0.2tar1},{r,0.2tar1,-0.2tar1},{r,-
0.2tar1,-0.2tar1},{r,-0.2tar1,0.2tar1}}],\[Theta]y \[Degree],{0,-
1,0}],\[Theta]x \[Degree],{0,0,1}],
If[l>0,{Blue,Rotate[Cone[{{1,0,0},{0,0,0}},0.05l],-(90-
2\[Theta]0)\[Degree],{0,1,0}],Nothing],
If[u=="точки",{Opacity[.9],Hue[ee/1500],(Point@trainDistribution3D1[m,k,l,\[Sigma]
a]x1,\[Sigma]y1,\[Sigma]z1,\[Sigma]x2,\[Sigma]y2,\[Sigma]z2,\[Sigma]x3,\[Sigma]y
3,\[Sigma]z3,\[Sigma]x4,\[Sigma]y4,\[Sigma]z4,\[Sigma]x5,\[Sigma]y5,\[Sigma]z5,\[
Sigma]x6,\[Sigma]y6,\[Sigma]z6,\[Sigma]x7,\[Sigma]y7,\[Sigma]z7,\[Sigma]x8,\[Si
igma]y8,\[Sigma]z8,\[Sigma]x9,\[Sigma]y9,\[Sigma]z9,\[Sigma]x10,\[Sigma]y10,\[Sig
ma]z10,x01,y01,z01,x02,y02,z02,x03,y03,z03,x04,y04,z04,x05,y05,z05,x06,y06,z06,x
07,y07,z07,x08,y08,z08,x09,y09,z09,x010,y010,z010,\[Mu]1,\[Mu]2,\[Mu]3,\[Mu]4,\[
Mu]5,\[Mu]6,\[Mu]7,\[Mu]8,\[Mu]9,\[Mu]10)[[#]])&/@Range[m]},
{Opacity[.9],Hue[ee/1500],trainDistribution3D[m,l,\[Sigma]x1,\[Sigma]y1,\[Sigma]
z1,\[Sigma]x2,\[Sigma]y2,\[Sigma]z2,\[Sigma]x3,\[Sigma]y3,\[Sigma]z3,\[Sigma]x4,
\[Sigma]y4,\[Sigma]z4,\[Sigma]x5,\[Sigma]y5,\[Sigma]z5,\[Sigma]x6,\[Sigma]y6,\[S
igma]z6,\[Sigma]x7,\[Sigma]y7,\[Sigma]z7,\[Sigma]x8,\[Sigma]y8,\[Sigma]z8,\[Sigm
a]x9,\[Sigma]y9,\[Sigma]z9,\[Sigma]x10,\[Sigma]y10,\[Sigma]z10,x01,y01,z01,x02,y
02,z02,x03,y03,z03,x04,y04,z04,x05,y05,z05,x06,y06,z06,x07,y07,z07,x08,y08,z08,x
09,y09,z09,x010,y010,z010}}]
},
ImageSize->{1000,500},PlotRange->{{-1.05 r,1.05 r},{-1.05 r,1.05 r},{1.05 r,-
1.05 r-(m+1.5)*tar1}},PlotRangePadding->0.001,
ViewVertical->{0,1,0},ViewVector->{{z,y,x},{0,0,0}},
Axes->True,AxesLabel->{"мм","мм","мм"},AxesStyle-
>{Directive[Black,12],Directive[Black,12],Directive[Black,12]},AxesEdge->{{1,-
1},{-1,1},{-1,1}},
"Схема движения пучка",Top,LabelStyle->{Large,Black,FontFamily->"Times"}
}],
Style["Параметры манипулятора",Bold,18,Red],Delimiter,

Control[{{q,"ПМ",Style["Переключатель
излучения",Bold,18]},{ "ПМ", "ДИ"},RadioButton}],Delimiter,

```

вида

```

Control[{{t, "F(\[Nu])", Style["Переключатель
графиков", Bold, 18]}, {"F(\[Lambda])", "F(\[Nu])"}, RadioButton}}, Delimiter,
Control[{{u, "точки", Style["Переключатель
схемы", Bold, 18]}, {"точки", "эллипсоиды"}, RadioButton}}, Delimiter,

Style["Характеристики пучка", Bold, 18],

{{k, 1000, Style["Кол-во частиц в пучке", 18]}, 1000, 10000, 1000, Appearance->"Open"},
{{m, 10, Style["Кол-во сгустков", 18]}, 1, 10, 1, Appearance->"Open"},
{{ee, 10, Style["Энергия, МэВ", 18]}, 0.001, 1000, 5, Appearance->"Open"}, Delimiter,

Column[{Style["Размеры сгустков", Bold, 18],
Row@{
Column@{
Column[{Control[{{\[Sigma]x1, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]y1, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]z1, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x2, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]y2, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]z2, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x3, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]y3, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]z3, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x4, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]y4, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]z4, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x5, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]y5, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]z5, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Spacer[50],
Column@{
Column[{Control[{{\[Sigma]x6, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]y6, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]z6, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x7, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],
мм", 18]}}, Control[{{\[Sigma]y7, 0.01, Style["Subscript\[Sigma],

```

```

MM",18}}}],Control[{{\[Sigma]z7,0.01,Style["Subscript\[Sigma], z7,
MM",18}}}],Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x8,0.01,Style["Subscript\[Sigma], x8,
MM",18}}}],Control[{{\[Sigma]y8,0.01,Style["Subscript\[Sigma], y8,
MM",18}}}],Control[{{\[Sigma]z8,0.01,Style["Subscript\[Sigma], z8,
MM",18}}}],Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x9,0.01,Style["Subscript\[Sigma], x9,
MM",18}}}],Control[{{\[Sigma]y9,0.01,Style["Subscript\[Sigma], y9,
MM",18}}}],Control[{{\[Sigma]z9,0.01,Style["Subscript\[Sigma], z9,
MM",18}}}],Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Sigma]x10,0.01,Style["Subscript\[Sigma], x10,
MM",18}}}],Control[{{\[Sigma]y10,0.01,Style["Subscript\[Sigma], y10,
MM",18}}}],Control[{{\[Sigma]z10,0.01,Style["Subscript\[Sigma], z10,
MM",18}}]}]}],Delimiter,

```

```

Column[{Style["Смещение ступтков",Bold,18],

```

```

Row@{

```

```

Column@{

```

```

Column[{Control[{{x01,0,Style["Subscript[x, 1],
MM",18}}}],Control[{{y01,0,Style["Subscript[y, 1],
MM",18}}}],Control[{{z01,0,Style["Subscript[z, 1], MM",18}}]}],Spacer[50],

```

```

Column[{Control[{{x02,0,Style["Subscript[x, 2],
MM",18}}}],Control[{{y02,0,Style["Subscript[y, 2],
MM",18}}}],Control[{{z02,0.1,Style["Subscript[z, 2], MM",18}}]}],Spacer[50],

```

```

Column[{Control[{{x03,0,Style["Subscript[x, 3],
MM",18}}}],Control[{{y03,0,Style["Subscript[y, 3],
MM",18}}}],Control[{{z03,0.2,Style["Subscript[z, 3], MM",18}}]}],Spacer[50],

```

```

Column[{Control[{{x04,0,Style["Subscript[x, 4],
MM",18}}}],Control[{{y04,0,Style["Subscript[y, 4],
MM",18}}}],Control[{{z04,0.3,Style["Subscript[z, 4], MM",18}}]}],Spacer[50],

```

```

Column[{Control[{{x05,0,Style["Subscript[x, 5],
MM",18}}}],Control[{{y05,0,Style["Subscript[y, 5],
MM",18}}}],Control[{{z05,0.4,Style["Subscript[z, 5], MM",18}}]}],Spacer[50],

```

```

Column@{

```

```

Column[{Control[{{x06,0,Style["Subscript[x, 6],
MM",18}}}],Control[{{y06,0,Style["Subscript[y, 6],
MM",18}}}],Control[{{z06,0.5,Style["Subscript[z, 6], MM",18}}]}],Spacer[50],

```

```

Column[{Control[{{x07,0,Style["Subscript[x, 7],
MM",18}}}],Control[{{y07,0,Style["Subscript[y, 7],
MM",18}}}],Control[{{z07,0.6,Style["Subscript[z, 7], MM",18}}]}],Spacer[50],

```

```

Column[{Control[{{x08,0,Style["Subscript[x, 8],
мм",18}}]},Control[{{y08,0,Style["Subscript[y, 8],
мм",18}}]},Control[{{z08,0.7,Style["Subscript[z, 8], мм",18}}]}],Spacer[50],
Column[{Control[{{x09,0,Style["Subscript[x, 9],
мм",18}}]},Control[{{y09,0,Style["Subscript[y, 9],
мм",18}}]},Control[{{z09,0.8,Style["Subscript[z, 9], мм",18}}]}],Spacer[50],
Column[{Control[{{x010,0,Style["Subscript[x, 10],
мм",18}}]},Control[{{y010,0,Style["Subscript[y, 10],
мм",18}}]},Control[{{z010,0.9,Style["Subscript[z, 10],
мм",18}}]}]}],Delimiter,

```

```

Column[{Style["Доля заряда",Bold,18],

```

```

Row@{

```

```

Column[{Control[{{\[Mu]1,0.1,Style["Subscript\[Mu], 1",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]2,0.1,Style["Subscript\[Mu], 2",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]3,0.1,Style["Subscript\[Mu], 3",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]4,0.1,Style["Subscript\[Mu], 4",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]5,0.1,Style["Subscript\[Mu], 5",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}]}],

```

```

Column[{Control[{{\[Mu]6,0.1,Style["Subscript\[Mu], 6",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]7,0.1,Style["Subscript\[Mu], 7",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]8,0.1,Style["Subscript\[Mu], 8",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]9,0.1,Style["Subscript\[Mu], 9",18}},0,1,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Mu]10,0.1,Style["Subscript\[Mu],
10",18}},0,1,Appearance->"Open"}]}],Delimiter,

```

```

Style["Угол наклона мишени",Bold,18],

```

```

{{\[Theta]0,45,Style["Subscript\[Theta], 0], град",18}},0, 90,5,Appearance-
>"Open"},Delimiter,

```

```

Style["Углы наблюдения",Bold,18],

```

```

Row@{

```

```

Control[{{\[Theta]x,0,Style["Subscript\[Theta], x], град",18}},-90,
90,5,Appearance->"Open"}],Spacer[60],
Control[{{\[Theta]y,0,Style["Subscript\[Theta], y], град",18}},-90,
90,5,Appearance->"Open"}]}],Delimiter,

```

```

Style["Диапазон отображения",Bold,18],

```

```

Row@{
Column[{Control[{{\[Lambda]min,0.003,Style["Subscript\[Lambda],
мм",18}},0,100,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Lambda]max,0.5,Style["Subscript\[Lambda],
мм",18}},0.05,100,Appearance->"Open"}]}],Spacer[50],
Column[{Control[{{\[Nu]min,0.01,Style["Subscript\[Nu],
ТГц",18}},0.01,9,Appearance-
>"Open"}],Control[{{\[Nu]max,10,Style["Subscript\[Nu],
ТГц",18}},1,10,Appearance->"Open"}]}],Delimiter,

Style["Точность",Bold,18],

{{pp,2,Style["PlotPoints ",18]},{2,4,5,8,10}},
{{mr,10,Style["MaxRecursion ",18]},{2,4,5,8,10}},

Style["Параметры схемы",Bold,18,Red],Delimiter,

{{tar1,0.09,Style["Размер мишени, мм",18]},0.09,2.7,Appearance->"Open"},
{{r,2.3tar1,Style["Расстояние до детектора, мм",18]},2 tar1,4tar1,Appearance-
>"Open"},
{{l,-1.5 tar1,Style["Движение слустков",18]},-1.5 tar1,(m+1.5)*tar1,Appearance-
>"Open"},

Style["Положение камеры",Bold,18],

{{z,20,Style["Параметр 1",18]},-20,20,0.0001},
{{y,4.6561,Style["Параметр 2",18]},-20,20,0.0001},
{{x,11.4286,Style["Параметр 3",18]},-20,20,0.0001},

ControlPlacement->Flatten[{Table[Left,70],Table[Right,34]}],SaveDefinitions-
>True]]

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Задайте параметры для вектора  $s$

```
ee=10;  
\[Theta]x=0\[Degree];  
\[Theta]y=0\[Degree];  
\[Theta]0=45\[Degree];  
s={-Cos\[Theta]x Cos\[Theta]y - (Sin\[Theta]y - 1/Sqrt[1 -  
(0.511)^2/ee^2])/Tan\[Theta]0, -Cos\[Theta]y Sin\[Theta]x, - (1/Sqrt[1 -  
(0.511)^2/ee^2])};
```

Файлы которые необходимо использовать

```
r=dataAstra;  
p=dataNum;  
u=(dataAstra[[#]]//Length)&/@Range[dataNum];
```

Уравнение

```
DiscreteFormFactor[k_,\[Lambda]_] := Module[{f}, f[x_] := Re[Exp[I (2\[Pi])/\[Lambda]  
s.(r[[k]][[#]]-x)]&/@Range[u[[k]]];  
(Total[ParallelMap[f,r[[k]],2]-u[[k]])/(u[[k]](u[[k]]-1))]  
DiscreteFormFactor[#,0.3]&/@Range[p]//AbsoluteTiming
```

Данные

```
TableOfDiscreteFormFactor=Table[{\[Lambda],DiscreteFormFactor[#,\[Lambda]]},{\[L  
ambda],0.01,0.5,0.005}]&/@Range[p]//AbsoluteTiming  
TableOfDiscreteFormFactor
```

Импорт данных

```
Export[NotebookDirectory[]<>"TableOfDiscreteFormFactor.dat",TableOfDiscreteFormF  
actor]  
Import[NotebookDirectory[]<>"TableOfDiscreteFormFactor.dat","Data"]
```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**

Таблица Г1 – подробные параметры последовательностей электронных сгустков для моделирования спектров переходного излучения

№, ссылка	Размеры, мм										Расстояние между сгустками; Отрицательная координата центра каждого сгустка, мм						Энергия, МэВ	Угол $\theta_y$ , град	Кол-во сгустков					
	$\sigma_z$					$\sigma_r$																		
1 [16]	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,19			0	0,35	0,7	1,05	1,35	1,65	1,95	45	0,65	7				
2 [14]	0,036	0,036	0,036	0,045	0,045	0,038	0,038	0,038	Те же, что и для продольного размера			0	0,276	0,573	0,896	1,197	1,563	1,94	2,38	3,3	8,87	8		
3 [17]	0,08					0,08					1,5						45	0,65	8					
4 [18]	0,11					1,87	2,06	2,1	2,21	2,20	2,15	2,09	1,96	0	0,55	1,08	1,56	2,07	2,55	3,04	3,55	2,8	10,46	8
5 [19]	0,005					0,16					0,15						1,8	16,27	2					
6 [20]	0,4	0,41		0,41		0,42				0,1			0	3,2		5,9		8,7		7,5	3,9	4		
7 [21]	0,00003439					0,00005					0,00174						0,028	54,26	2					
8 [15]	0,000001					0,005					0,0006						5	5,86	10					
9 [22]	0,0000006					0,005					0,00000871						4,5	6,51	5					
10 [23]	0,000123					0,01					0,00077						60	0,49	4					

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

```

c1=0.3;
F1[m_, \[Lambda]_, ee_, \[Theta]0_,
\[Theta]y_, \[Theta]x_, \[Sigma]y_, \[Sigma]x_, \[Sigma]z_, l_] := Module[{a, b, c, \[Beta]
], z, \[Nu], i},
a = -Cos[\[Theta]x] Cos[\[Theta]y] - (Sin[\[Theta]y] - 1/\[Beta]) / Tan[\[Theta]0];
b = -Cos[\[Theta]y] Sin[\[Theta]x];
c = -(1/\[Beta]);
\[Beta] = Sqrt[1 - (0.511)^2/ee^2];
\[Lambda] = c1/\[Nu];
z = 1*(i-1);
1/m^2*Exp[-((4\[Pi]^2)/\[Lambda]^2) (\[Sigma]x^2 a^2 + \[Sigma]y^2 b^2 + \[Sigma]z^2
c^2)] (Abs[Sum[Exp[-I*(2\[Pi])/\[Lambda]*z*c ], {i, 1, m}]]^2]
Framed[Manipulate[Quiet[Grid@{If[t=="F(\[Lambda])",
Labeled[Plot[F1[m, \[Lambda], ee, \[Theta]0 \[Degree], \[Theta]y \[Degree], \[Theta]x
\[Degree], \[Sigma]y, \[Sigma]x, \[Sigma]z, l], {\[Lambda], \[Lambda]min, \[Lambda]max}
,
Frame->True, FrameLabel->{"\[Lambda], мм", "F(\[Lambda]), отн. ед."},
PlotStyle->{Thickness[.0035], Red}, PlotRange->{0, 1},
ImageSize->{600, 500}, AxesStyle->{{Black, Thick}, {Black, Thick}},
LabelStyle->{Large, Black, FontFamily->"Times"},
PlotPoints->pp, MaxRecursion->mr, ImagePadding->All],
"Форм фактор в зависимости от длины волны излучения", Top, LabelStyle-
>{Large, Black, FontFamily->"Times"}],
Labeled[Plot[F1[m, c1/\[Nu], ee, \[Theta]0 \[Degree], \[Theta]y \[Degree], \[Theta]x
\[Degree], \[Sigma]y, \[Sigma]x, \[Sigma]z, l], {\[Nu], \[Nu]min, \[Nu]max},
Frame->True, FrameLabel->{"\[Nu], ТГц", "F(\[Nu]), отн. ед."},
PlotStyle->{Thickness[.0035], Red}, PlotRange->{0, 1},
ImageSize->{600, 500}, AxesStyle->{{Black, Thick}, {Black, Thick}},
LabelStyle->{Large, Black, FontFamily->"Times"},
PlotPoints->pp, MaxRecursion->mr, ImagePadding->All],
"Форм фактор в зависимости от частоты излучения", Top, LabelStyle-
>{Large, Black, FontFamily->"Times"}]]],
{Labeled[Graphics3D[
{
(*Оси*)
Black, Arrowheads[Large],
{Arrow[{{-1.05 r - (m+1)*1 + If[z0<0, z0, 0], 0, 0}, {1.5tar1, 0, 0}],
Arrow[{{0, 0, 0}, {0, 0, -1.5tar1}],
Arrow[{{0, 0, 0}, {0, 1.5tar1, 0}],
(*Подписи осей*)
Text[Style["Z", Large, 18], {2 tar1, 0, 0}],

```

```

Text[Style[ "Y",Large,18],{0,2 tar1,0}],
Text[Style[ "X",Large,18],{0,0,-2 tar1}],
(*Мишень*)
Rotate[{{Green,Parallelepiped[{-tar1,tar1,0},{2tar1,0,0},{0,-
2tar1,0}]}},\[Theta]0 \[Degree],{0,1,0}],
(*Детектор*)
Rotate[Rotate[{{Yellow,Polygon[{{r,0.2tar1,0.2tar1},{r,-0.2tar1,0.2tar1},{r,-
0.2tar1,-0.2tar1},{r,0.2tar1,-0.2tar1}]}},\[Theta]y \[Degree]-\[Pi]/2,{0,-
1,0}],\[Theta]x \[Degree],{1,0,0}],
(*Спустки*)
Translate[{{Hue[ee/1500],Ellipsoid[{z0,0,0},{3\[Sigma]z,3\[Sigma]y,3\[Sigma]x}]}},
Table[{-1*(i-1),0,0},{i,m}],
(*Конус излучения*)
If[z0>0,{Blue,Rotate[Cone[{{0,0,-z0},{0,0,0}},0.05z0],-(90\[Degree]-2\[Theta]0
\[Degree]),{0,1,0}],Nothing]
},
(*Общие настройки внешнего вида схемы*)
Boxed->True,ImageSize->{500,500},PlotRangePadding->0.001, PlotRange->{{1.05 r,-
1.05 r-(m-1)*1},{-1.05 r,1.05 r},{-1.05 r,1.05 r}},ViewVertical-
>{0,1,0},ViewVector->{{z,-y,-x},{0,0,0}},Axes->True],
"Схема движения пучка",Top,LabelStyle->{Large,Black,FontFamily->"Times"}]]],

Style["Параметры манипулятора",Bold,18,Red],Delimiter,
Control[{{t,"F(\[Nu])",Style["Переключатель
графиков",Bold,18]},{f,"F(\[Lambda])",Style["F(\[Nu])",RadioButton]}},Delimiter,
Style["Характеристики пучка",Bold,18],
{{m,2,Style["Кол-во спустков",18]},{1,10,1,Appearance->"Open"},
{{ee,10,Style["Энергия, МэВ",18]},{5,1000,100,Appearance->"Open"},
{{l,0.1,Style["Расстояние между спустками, мм",18]},{0.01,3,0.01,Appearance-
>"Open"}},Delimiter,
Style["Размеры спустков",Bold,18],
Row@{Column[{{Control[{{\[Sigma]x,0.01,Style["Subscript[\[Sigma], x],
мм",18}},{0.01,0.3,Appearance-
>"Open"}]},Control[{{\[Sigma]y,0.01,Style["Subscript[\[Sigma], y],
мм",18}},{0.01,0.3,Appearance->"Open"}]}]}},
Spacer[50],
Column[{{Control[{{\[Sigma]z,0.01,Style["Subscript[\[Sigma], z],
мм",18}},{0.01,0.3,Appearance->"Open"}]}]}},Delimiter,
Style["Угол наклона мишени",Bold,18],
{{\[Theta]0,45,Style["Subscript[\[Theta], 0], град",18]},{0, 90,5,Appearance-
>"Open"}},Delimiter,
Style["Углы наблюдения",Bold,18],

```

