

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

Школа инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки технологии радиационной безопасности
 Отделение школы (НОЦ) отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Черенковское излучение от наклонной диэлектрической пластины

УДК 621.384.66:539.1.074.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Т. Атовуллаев		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	В.А. Трясучев	д.ф-м.н		

Консультант

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ИШЯТ ОЯТЦ	Д.А. Веригин	к.ф-м.н		

Планируемые результаты обучения

Код ре- зультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиозоологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) Ядерные физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Веригин Д. А.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОАМ74	Атовуллаеву Тимур

Тема работы:

Черенковское излучение от наклонной диэлектрической пластины	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	
Срок сдачи студентом выполненной работы:	

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Результатом исследования стало моделирование спектрально-угловых характеристик черенковского излучения от наклонной диэлектрической пластины. Исследованы зависимости углового распределения от толщины и угла поворота мишени. Разработанный код позволяет выбрать толщину кварцевой мишени для экспериментов по диагностике расходимости электронного пучка.
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы по диагностике и моделированию углового распределения пучка. 2. Написание программы, позволяющей получать угловое распределение ИВЧ от пластин любой толщины с заданным коэффициентом преломления с учетом угла многократного рассеяния. 3. Исследование зависимости углового распределения ИВЧ от угла наклона и толщины кварцевой мишени. 4. Изучение влияния многократного рассеяния электронов на вид углового распределения.
---	--

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>
--

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Е. В.
Социальная ответственность	Гоголева Т. С.
Иностранный язык	Шайкина О. И.

Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:
1. Введение
2. Литературный обзор

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.02.2019
---	------------

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОАМ74	Атовуллаев Тимур		

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) Ядерная физика и технологии
 Уровень образования Магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения (весенний семестр 2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2019	<i>Обзор литературы по теме исследования</i>	5
01.04.2019	<i>Написание программы по заданной формуле.</i>	15
10.04.2019	<i>Получение графиков</i>	10
15.05.2019	<i>Анализ полученных моделей исследования</i>	10

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Технологии радиационной безопасности	Веригин Д. А.	к.ф.-м.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕ-
РЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM74	Атовуллаев Тимур

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	1. <i>Затраты на специальное оборудование</i> 10300 руб. 2. <i>Затраты по основной заработной плате</i> 63205 руб. 3. <i>Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы</i> 6321 руб. 4. <i>Отчисления во внебюджетные фонды</i> 18842 руб. 5. <i>Накладные расходы</i> 20857 руб. 6. <i>Прочие прямые затраты</i> 197 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Тариф на промышленную электроэнергию</i> – 5,8 руб. за 1 кВт·ч <i>Районный коэффициент города Томска</i> – 1,3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Размер страховых взносов</i> – 30% <i>Пониженная ставка</i> – 27,1%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Оценочная карта конкурентных технических решений</i>
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Иерархическая структура работ</i>
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Определение ресурсоэффективности проекта</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i> 2. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i> 3. <i>Матрица SWOT</i> 4. <i>График проведения и бюджет НТИ</i> 5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i> 6. <i>Потенциальные риски</i>
--

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Атовуллаев Тимур		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM74	Атовуллаев Тимур

Школа		Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Магистрант	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/Технологии радиационной безопасности

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Т. Атовуллаев		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 96 с., 23 рис., 24 табл., 27 источников.

Ключевые слова: черенковское излучение, спектрально-угловое распределение, наклонная мишень, наклонная пластина, интенсивность излучения, микротрон ТПУ.

Объект исследования: черенковское излучение от наклонной диэлектрической пластины.

Цель работы – освоить подход, основанный на методе изображений и написать код, пригодный для расчета характеристик ИВЧ от пластин любой толщины с заданным коэффициентом преломления.

В процессе исследования проводилось моделирование угловых распределений черенковского излучения от наклонной диэлектрической пластины.

Степень внедрения: предмет исследования находится на стадии разработки.

Область применения: диагностика пучков заряженных частиц.

Значимость работы: усовершенствование и создание новых методов диагностики заряженных пучков.

Работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016 с применением пакета Wolfram Mathematica 11.1.

Экономическая эффективность: значимость работы на данный момент не установлена, т.к. предмет исследования находится на стадии разработки.

Оглавление

Введение.....	11
1. Теоретическая часть.....	13
1.1 Спектрально-угловое распределение.....	13
1.2 Угол многократного рассеяния.....	18
2. Написание и проверка программы.....	21
2.1 Программа для расчета спектрально углового распределения.....	21
2.2 Программа для расчета угла многократного рассеяния.....	25
3. Результаты расчетов и анализ.....	27
3.1 Получение и исследование полярного распределения интенсивности ИВЧ при разных углах наклона мишени в системе отсчета, связанной с проходящим пучком электронов, без учета угла многократного рассеяния.....	27
3.2 Получение и исследование трехмерного распределения интенсивности ИВЧ при заданном угле наклона мишени.....	32
3.3 Получение полярного распределения интенсивности ИВЧ при заданном угле наклона мишени с учетом угла многократного рассеяния.....	37
3.4 Получение полярного распределения интенсивности ИВЧ и получение угла наклона мишени при известном угле расположения детектора.....	39
3.5 Исследование полярного и азимутального распределения интенсивности ИВЧ при разных углах наклона мишени.....	42
4. Социальная ответственность.....	46
4.1 Анализ опасных и вредных факторов.....	47
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	49
4.2.1 Технические мероприятия.....	49
4.2.2 Условия безопасной работы.....	51

4.2.3 Электробезопасность	54
4.2.4 Пожарная и взрывная безопасность	56
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	60
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений	60
5.1.3 SWOT-анализ.....	62
5.2. Инициация проекта	66
5.3. Планирование управления научно-техническим проектом.....	69
5.3.1. План проекта.....	69
5.3.2. Бюджет научного исследования	73
5.3.3 Реестр рисков проекта	79
5.4. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	80
Заключение и выводы	83
Список литературы	86
Приложение I.....	89

Введение

Данная работа посвящена изучению оптического черенковского излучения, возникающего при прохождении пучка электронов через наклонную диэлектрическую пластину. Черенковское излучение возникает при прохождении заряженной частицы через среду, со скоростью большей скорости света в данной среде.

Черенковское излучение нашло широкое применение при создании детекторов элементарных частиц. Однако, в последние годы некоторые авторы нашли применение черенковского излучения для диагностики электронных пучков, генерирующих это излучение при прохождении через диэлектрическую пластину. В частности, в 2015 году в эксперименте на линейном ускорителе SAGA-LS в Японии было исследовано черенковское излучение, возникающее при прохождении пучка электронов с энергией 255 МэВ через кристалл алмаза [12]. В данном эксперименте использовался метод, при котором детектор размещался перпендикулярно направлению пучка, а угол выхода излучения подбирался путем поворота мишени (рис.1).

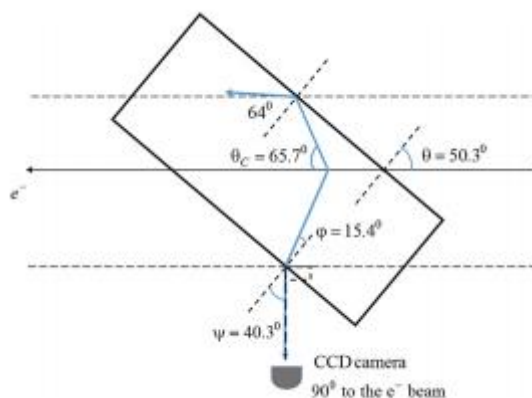


Рисунок 1. Ориентация мишени в японском эксперименте, при которой излучение попадает на детектор.

Для возможного использования черенковского излучения для диагностики пучков (в том числе протонных и ионных) желательно предварительно промоделировать характеристики изучаемого излучения, в частности угловое распределение. К сожалению, на сегодняшний день

аналитические методы позволяют получить такие характеристики только для простейших геометрий мишеней. Например, для излучения из наклонной пластины применим метод изображений Пафомова [16]. Метод поляризационных токов [14] может использоваться для мишеней более сложной геометрии.

На томском микротроне планируется провести эксперимент подобный японскому, с энергией электронов 6 МэВ и с использованием мишени из кварца. Соответственно, целью работы является: освоить подход, основанный на методе изображений и написать код, пригодный для расчета характеристик ИВЧ от пластин любой толщины с заданным коэффициентом преломления. Задача: провести расчеты для энергии томского микротрона и для кристалла кварца.

1. Теоретическая часть

1.1 Спектрально-угловое распределение.

Излучение заряда, движущегося со сверхсветовой скоростью в среде (излучение Вавилова-Черенкова, ИВЧ), обнаруженное более 80 лет назад [1, 2], широко используется при детектировании элементарных частиц [3, 4]. В последние годы предлагалось использовать механизм когерентного ИВЧ для разработки и создания источников излучения в ТГц и суб-ТГц диапазонах [5, 6]. Схемы подобных источников предполагают использование рабочего объёма диэлектрика, например, в виде призмы [7, 8] для вывода излучения в вакуум. На сегодняшний день отсутствуют аналитические методы расчёта характеристик ИВЧ, которое генерируется в радиаторах произвольной формы. В цикле работ [9, 10] был предложен подход, так называемый метод поляризационных токов, позволяющий вычислять спектрально-угловое распределение ИВЧ в конечных мишенях произвольной формы, например, в пластине и призме [11].

В эксперименте [12] исследовались характеристики оптического ИВЧ при его генерации пучком электронов с энергией 255 МэВ в наклонной пластинке алмаза толщиной $L = 50$ мкм. Для длины волны $\lambda = 0.5$ мкм показатель преломления алмаза $n \approx 2.43$ [13]. Чтобы вывести оптическое ИВЧ избегая эффекта полного внутреннего отражения на выходной грани, в цитируемой работе исследовалось излучение, испускаемое под углом 90.5° относительно импульса электрона, из пластины, наклонённой под углом $\psi = 50.3^\circ$ (см. рис.1а).

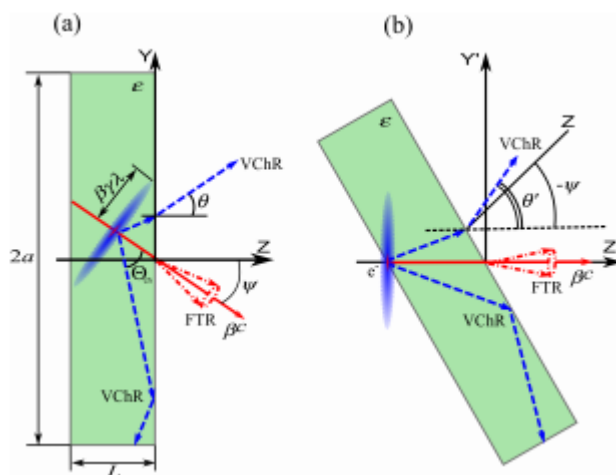


Рисунок 2. Угловые переменные, используемые для описания излучения Вавилова-Черенкова.

Очевидно, что только часть ИВЧ, испускаемого вдоль образующих конуса с углом при вершине $\theta_{ch} = \arccos(1/(\beta\sqrt{\epsilon}))$ (ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, $\beta = v/c$, v – скорость движения заряженной частицы, c – скорость света) может выйти из диэлектрика в вакуум, тогда как часть излучения из-за полного внутреннего отражения не выходит из мишени (см. рис.1а). Как результат, азимутальная симметрия распределения ИВЧ в вакууме будет нарушаться. Другой вариант нарушения азимутальной симметрии излучения был рассмотрен в статье [14], где исследовались характеристики ИВЧ, возникающего при пролёте заряда в вакууме вблизи диэлектрической мишени (так называемое «cherenkov diffraction radiation» [15]). В данной работе мы исследуем традиционный механизм ИВЧ.

В работах В.Е. Пафомова [16] были получены выражения, описывающие спектрально-угловое распределение ИВЧ на выходе из наклонной, безграничной в поперечном направлении пластины, которые позволяют анализировать асимметричное азимутальное распределение ИВЧ, однако подобного анализа ранее не проводилось.

Следует отметить, что в эксперименте [12] исследовалась зависимость выхода ИВЧ от угла поворота мишени, отсчитываемого от направления электронного пучка для фиксированного азимутального угла $\varphi = 0^\circ$ (т.е. в

плоскости рисунка 1а). Представляет несомненный интерес выяснить зависимость спектрально-угловых характеристик ИВЧ от степени нарушения аксиальной симметрии в рассматриваемой геометрии.

В системе координат, где ось z направлена вдоль перпендикуляра к выходной поверхности пластины (см. рис.1а), формулы для интенсивностей компонент ИВЧ поляризованных в параллельной (проходящей через ось z и вектор скорости заряженной частицы) и перпендикулярной плоскостях даются выражениями (18.25), (18.26) статьи [16]. Эти выражения позволяют рассчитать спектрально-угловое распределение ИВЧ в безграничной пластине толщины L с диэлектрической проницаемостью ϵ с учётом эффекта многократного переотражения излучения внутри пластинки:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W_{\parallel}}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2}{\pi^2 c} \frac{\beta_z^2 n_z^2 |\epsilon - 1|^2}{\sin^2(\theta) \left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 n_z^2 \right|^2} \times \\ &\times \frac{\left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 Z^2 \right|^{-2}}{\left| e^{-\frac{i\omega LZ}{c}} (Z + \epsilon \cos(\theta))^2 - e^{\frac{i\omega LZ}{c}} (Z - \epsilon \cos(\theta))^2 \right|^2} \times \\ &\times \left| e^{-\frac{i\omega LZ}{c}} (1 - n_y \beta_y + \beta_z Z)(Z + \epsilon \cos(\theta)) \times (\sin^2(\theta)(1 - \beta_z^2 - n_y \beta_y - \right. \\ &- \beta_z Z) + n_y \beta_y \beta_z Z) + e^{\frac{i\omega LZ}{c}} (1 - n_y \beta_y - \beta_z Z)(Z - \epsilon \cos(\theta)) \times (\sin^2(\theta)(1 - \beta_z^2 - \\ &- n_y \beta_y + \beta_z Z) - n_y \beta_y \beta_z Z) - 2Ze^{-\frac{i\omega L(1 - n_y \beta_y)}{\beta_z c}} \left[\beta_z (n_y \beta_y - \sin^2(\theta)) \times (\beta_z \epsilon - \right. \\ &- \beta_z \sin^2(\theta) + \epsilon n_z - n_y \beta_y \beta_z Z) + \sin^2(\theta)(1 - \beta_z^2 - n_y \beta_y)(1 - n_y \beta_y + \\ &\left. \left. + n_z \beta_z \epsilon) \right] \right|^2 (1) \\ \frac{d^2 W_{\perp}}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2}{\pi^2 c} \frac{\beta_z^2 n_z^2 \beta_y^2 n_x^2 |\epsilon - 1|^2}{\sin^2(\theta) \left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 n_z^2 \right|^2} \times \\ &\times \frac{\left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 Z^2 \right|^{-2}}{\left| e^{-\frac{i\omega LZ}{c}} (Z + \epsilon \cos(\theta))^2 - e^{\frac{i\omega LZ}{c}} (Z - \epsilon \cos(\theta))^2 \right|^2} \times \end{aligned}$$

$$\times |e^{-\frac{i\omega LZ}{c}}(1 - n_y\beta_y + \beta_z Z)(Z + \varepsilon \cos(\theta)) + e^{\frac{i\omega LZ}{c}}(1 - n_y\beta_y - \beta_z Z)(Z - \varepsilon \cos(\theta)) - 2Ze^{-\frac{i\omega L(1-n_y\beta_y)}{\beta_z c}}(1 - n_y\beta_y + n_z\beta_z\varepsilon)|^2 \quad (2)$$

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2W_{\perp}}{d\omega d\Omega} + \frac{d^2W_{\parallel}}{d\omega d\Omega} \quad (3)$$

Здесь:

θ, ϕ -полярный и азимутальный углы вылета излучения (см. рис 2).

Ψ - угол наклона мишени относительно пучка (см. рис 2).

β_y, β_z -проекции скорости электронов на оси y и z в единицах c :

$$\beta_y[\psi] = -\beta \cdot \sin[\psi]; \quad (4)$$

$$\beta_z[\psi] = \beta \cdot \cos[\psi];$$

n_x, n_y, n_z – направляющие косинусы.

$$n_x = \sin[\theta] \cdot \sin[\phi];$$

$$n_y = \sin[\theta] \cdot \cos[\phi]; \quad (5)$$

$$n_z = \cos[\theta];$$

$$Z = \sqrt{\varepsilon - \sin^2[\theta]};$$

ω - частота излучения с длиной волны λ .

Выражения (1) и (2) описывают поляризационные компоненты спектральной плотности энергии не только излучения Вавилова-Черенкова, но и переходного излучения «вперёд» («Forward Transition Radiation»), которое распространяется в полупространство $z > 0$.

Согласно [17] более простой для анализа является система координат, представленная на рис.1b, где ось z' направлена вдоль импульса электрона. Переменные в обеих системах связаны стандартной матрицей поворота на угол ψ , что позволяет преобразовать выражения (1, 2) к более удобным угловым

переменным θ' , φ' (θ' – угол между волновым вектором и импульсом электрона, φ' – азимутальный угол, см. рис. 1b). Связь между направляющими косинусами в штрихованной системе координат $N_x = \sin(\theta') \sin(\varphi')$, $N_y = \sin(\theta') \cos(\varphi')$, $N_z = \cos(\theta')$, и в исходной системе координат даётся формулами $N_x = n_x$, $N_y = n_y \cos(\psi) + n_z \sin(\psi)$, $N_z = n_z \cos(\psi) - n_y \sin(\psi)$, из которых выводятся необходимые формулы:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta') \cos(\psi) + \sin(\theta') \cos(\varphi') \sin(\psi) \quad (4)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{\sin(\theta') \sin(\varphi')}{\sin(\theta') \cos(\varphi') \cos(\psi) - \cos(\theta') \sin(\psi)} \quad (5)$$

Как отмечалось выше, выражения (1, 2) справедливы только для неограниченной в поперечном направлении пластины. Чтобы учесть размеры пластины необходимо воспользоваться методом поляризационных токов.

Окончательное выражение полученное в [17] для спектрально-угловой плотности в вакууме поляризационного излучения вышедшего из передней «выходной» грани (грань перпендикулярная оси z (см. рис. 1a)) мишени после всех математических преобразований имеет более простой вид по сравнению с формулой В.Е. Пафомова (3):

$$\begin{aligned} \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = & \frac{e^2}{\pi^2 c} \frac{\beta_z^2 \cos^2(\theta)}{((1-n_y\beta_y)^2 - \beta_z^2 \cos^2(\theta))^2} \left| \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} \right|^2 \times (\beta_y^2 \beta_z^2 \sin^2(\theta) (|Z|^2 + \\ & + \sin^2(\theta)) \left| \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\cos(\theta)+Z} \right|^2 + \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon \cos(\theta)+Z} \right|^2 |(\beta_z^2 + n_y\beta_y + \beta_z Z - 1) \sin(\theta) - \\ & - \beta_z \beta_y \cos(\theta) Z|^2) \left| \frac{1-e^{-\frac{i\omega L(1-n_y\beta_y-\beta_z Z)}{\beta_z c}}}{1-n_y\beta_y-\beta_z Z} \right|^2 \quad (6) \end{aligned}$$

Там же проведено сравнение результатов расчетов методом поляризационных токов и по формуле Пафомова для алмазной мишени с толщиной 50 мкм, используемой в эксперименте [12], ориентированной под углом $\psi = 50.3^\circ$.

Таким образом в [17] было показано что результаты, полученные методом поляризационных токов и методом изображений Пафомова, дают идентичные зависимости и одинаково хорошо согласуются с экспериментальными данными

[12]. Следовательно, оба метода являются пригодными для моделирования спектрально углового распределения черенковского излучения для пластины в форме параллелепипеда.

1.2 Угол многократного рассеяния

При прохождении заряженных частиц через вещество, частицы испытывают многократное рассеяние за счет кулоновского взаимодействия с ядрами среды. Рассмотрим 2 подхода к нахождению угла многократного рассеяния. Первый подход основан на использовании специальных распределений. Наиболее часто для расчета используют распределения Мольера и Гоудсмита-Саундерсона. Распределение Гоудсмита-Саундерсона имеет слабую сходимость, поэтому используем для оценки угла многократного рассеяния распределение Мольера. Функция распределения Мольера имеет вид [18]:

$$f_m(\vartheta)d\vartheta = \left[f^{(0)}(\theta) + \frac{f^{(1)}(\theta)}{B} + \frac{f^{(2)}(\theta)}{B^2} + \dots \right] \theta d\theta \quad (7)$$

Где ϑ – угол в лабораторной системе координат, θ – параметр рассеяния, который задается следующим соотношением:

$$\theta = \vartheta / \sqrt{\chi_c^2 B},$$

$$\chi_c^2 = \frac{0,157 Z(Z+1)s}{A(pv)^2}, \quad (pv)^2 = \left[\frac{T(T + 2mc^2)}{T + mc^2} \right]^2, \quad (8)$$

Z – заряд ядра, A – массовое число, pv – произведение импульса налетающей частицы на ее скорость в МэВ, T – кинетическая энергия налетающей частицы в МэВ, s – путь частицы в единицах радиационной длины ($\text{г}/\text{см}^2$). Параметр B можно найти из следующих соотношений:

$$B = 0,5815 + 1,391b - 0,031b^2 + 0,00127b^3 - 0,00002b^4, \text{ если } b \geq 2,61.$$

$$B = -6,323 + 13,45b - 8,136b^2 + 2,421b^3 - 0,2676b^4, \text{ если } b < 2,61.$$

$$b = \ln(\Omega_0/1,167) \quad (9)$$

$$\Omega_0 = 7821,6 \cdot Z^{1/3} (Z + 1) A^{-1} s \beta^{-2} \left[1 + 3,33 \left(\frac{Z}{137\beta} \right)^2 \right]^{-1}$$

Где β – относительная скорость налетающей частицы.

Параметры $f^{(0)}$, $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ задаются выражением [20]:

$$f^{(n)}(\theta) = \frac{2}{\pi n!} \int_0^\infty dy \cos(\theta y) e^{\frac{y^2}{4}} \left(\frac{y^2}{4} \log \frac{y^2}{4} \right)^n \quad (10)$$

Получаем, что

$$f^{(0)} = 2e^{-\theta^2} \quad (11)$$

Тогда в нулевом приближении можно сказать, согласно формулам (7), (8) и (11) функция распределения равна:

$$dF(\vartheta) = \frac{2\vartheta e^{-\frac{\vartheta^2}{\kappa^2 B}}}{\kappa^2 B} d\vartheta$$

Тогда среднее значение угла ϑ многократного рассеяния в нулевом приближении определяется по известной плотности вероятности:

$$\bar{\vartheta} = \int_0^\infty \frac{2\vartheta e^{-\frac{\vartheta^2}{\kappa^2 B}}}{\kappa^2 B} \vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{\pi \kappa^2 B}}{2} \quad (12)$$

Второй подход пригоден для оценки и проверки правильности расчета угла многократного рассеяния. Среднеквадратичный угол многократного рассеяния на пути t приблизительно равен:

$$\bar{\vartheta} = \frac{E_s}{T} \sqrt{\frac{t}{R_0}} \quad (13)$$

Здесь $E_s \approx 21$ МэВ, T – кинетическая энергия электронов в МэВ, R_0 – радиационная длина.

Для нахождения радиационной длины можно воспользоваться формулой:

$$R_0 \approx \frac{716 A}{Z(Z+1) \log\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)} \text{ (см)} \quad (14)$$

Где A – массовое число, Z – зарядовое число.

Таким образом, были выписаны все необходимые формулы для расчета спектрально-углового распределения интенсивности излучения и для нахождения угла многократного рассеяния электронов в мишени.

2. Написание и проверка программы

2.1 Программа для расчета спектрально углового распределения

Повторим расчеты спектрально-углового распределения по полярному углу с начальными данными из статьи [17]. Все расчеты были выполнены в программе Wolfram Mathematica 11.1. Для этого:

1) Зададим константы:

$c=2.99792458 \cdot 10^8$ м/с; скорость света

$m_e=0.5109989461 \cdot 10^{-6}$ эВ; масса электрона

2) Зададим начальные параметры:

$\xi=2.43^2$; диэлектрическая проницаемость алмаза

$\lambda=0.5 \cdot 10^{-6}$ м; длина волны черенковского излучения

$L=50 \cdot 10^{-6}$ м; толщина мишени

$E_{el}=255 \cdot 10^6$ эВ; энергия электронов

3) Запишем формулы для расчета частоты излучения и относительной скорости электронов:

$\omega=(2 \cdot \pi \cdot c)/\lambda$; частота излучения

$a=E_{el}/m_e$; (15)

$\beta = \sqrt{\frac{a^2 + 2 \cdot a}{a^2 + 2 \cdot a + 1}}$; относительная скорость электронов

4) Перейдем в систему координат, связанную с пучком (пучок летит вдоль оси Z') к углам θ_1 , ϕ_1 , ψ_1 (рис. 2) используя формулы 4 и 5:

$\theta[\theta_1, \phi_1, \psi] = \text{ArcCos}[\text{Cos}[\theta_1] \cdot \text{Cos}[\psi] + \text{Sin}[\theta_1] \cdot \text{Cos}[\phi_1] \cdot \text{Sin}[\psi]]$; (16)

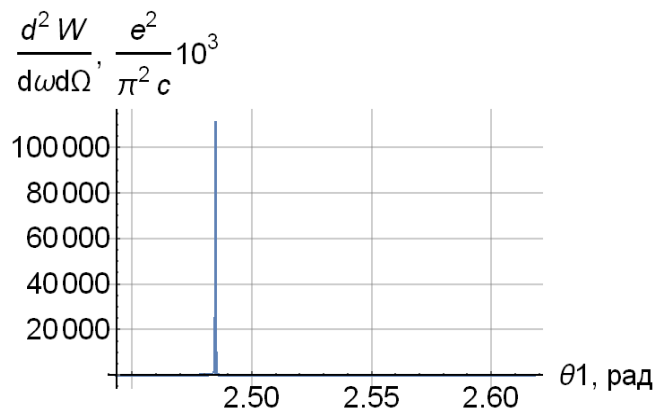
$$\phi[\theta_1, \phi_1, \psi] = \begin{cases} \text{ArcTan} \left[\frac{\text{Sin}[\theta_1] * \text{Sin}[\phi_1]}{\text{Sin}[\theta_1] * \text{Cos}[\phi_1] * \text{Cos}[\psi] - \text{Cos}[\theta_1] * \text{Sin}[\psi]} \right], & \text{при } -\psi < \theta_{ch} \\ \text{ArcTan} \left[\frac{\text{Sin}[\theta_1] * \text{Sin}[\phi_1]}{\text{Sin}[\theta_1] * \text{Cos}[\phi_1] * \text{Cos}[\psi] - \text{Cos}[\theta_1] * \text{Sin}[\psi]} \right] + \pi, & \text{при } -\psi > \theta_{ch} \end{cases}; \quad (17)$$

5) Сделаем замену в формулах 4 и 5. Тогда формула 6 для спектрально-углового распределения переписывается в виде:

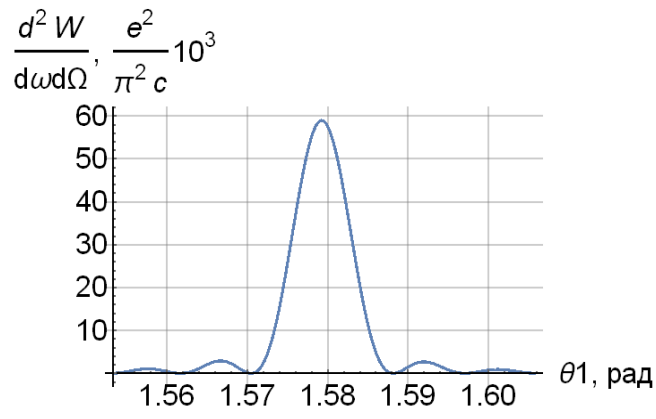
$$F[\theta_1, \phi_1, \psi] = 10^{-3} * \frac{\beta z[\psi]^2 * \text{Cos}[\theta[\theta_1, \phi_1, \psi]]^2}{((1 - \beta y[\psi] * n y[\theta_1, \phi_1, \psi])^2 - \beta z[\psi]^2 * \text{Cos}[\theta[\theta_1, \phi_1, \psi]]^2)^2} \text{Abs} \left[\frac{\xi - 1}{\xi} \right]^2 * \left(\beta y[\psi]^2 * \beta z[\psi]^2 * \text{Sin}[\phi[\theta_1, \phi_1, \psi]]^2 * (\text{Abs}[Z[\theta_1, \phi_1, \psi]]^2 + \text{Sin}[\theta[\theta_1, \phi_1, \psi]]^2) * \text{Abs} \left[\frac{\sqrt{\xi}}{\text{Cos}[\theta[\theta_1, \phi_1, \psi]] + Z[\theta_1, \phi_1, \psi]} \right]^2 + \text{Abs} \left[\frac{\xi}{\xi * \text{Cos}[\theta[\theta_1, \phi_1, \psi]] + Z[\theta_1, \phi_1, \psi]} \right]^2 * \text{Abs} \left[(\beta z[\psi]^2 + n y[\theta_1, \phi_1, \psi] * \beta y[\psi] + \beta z[\psi] * Z[\theta_1, \phi_1, \psi] - 1) * \text{Sin}[\theta[\theta_1, \phi_1, \psi]] - \beta y[\psi] * \beta z[\psi] * \text{Cos}[\phi[\theta_1, \phi_1, \psi]] * Z[\theta_1, \phi_1, \psi] \right]^2 \right) * \text{Abs} \left[\frac{1 - \text{Exp} \left[-\frac{l * \omega * L * (1 - \beta z[\psi] * Z[\theta_1, \phi_1, \psi] - n y[\theta_1, \phi_1, \psi] * \beta y[\psi])}{\beta z[\psi] * c} \right]}{1 - \beta z[\psi] * Z[\theta_1, \phi_1, \psi] - n y[\theta_1, \phi_1, \psi] * \beta y[\psi]} \right]^2; \quad (18)$$

Отметим, что формула 18 записана в единицах $\frac{e^2}{\pi^2 c} 10^3$.

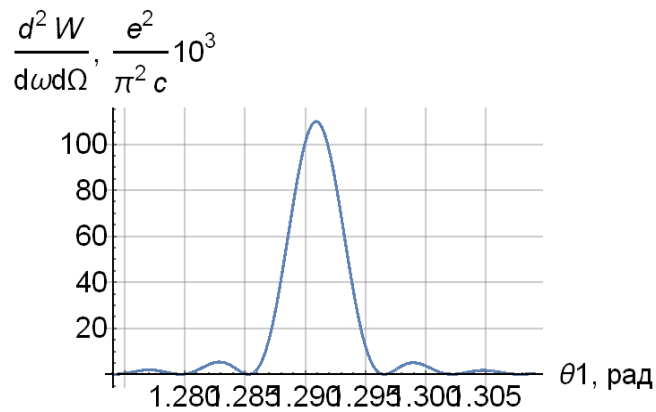
Используя формулу 18, были построены графики полярного распределения по θ_1 в алмазе, при $\phi = 0^0$ и $-\psi = 30; 50.3; 60$ и 70^0 .



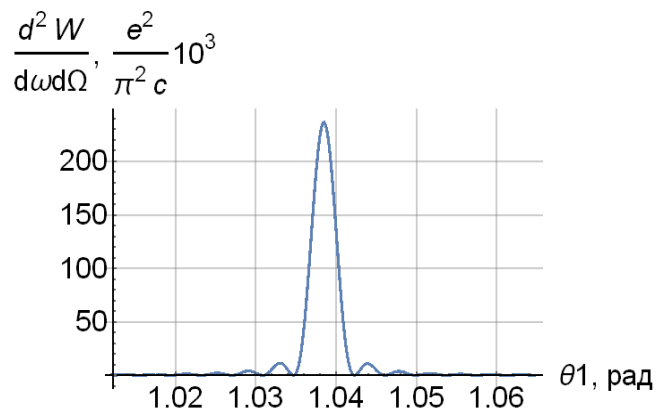
a)



б)



в)



г)

Рисунок 3. Графики полярного распределения излучения при $\phi_1 = 0^\circ$.

Графики а, б, в, г соответствуют углам $-\psi = 30; 50.3; 60; 70^\circ$.

Также были рассчитаны значения функции и угла в максимуме. Результаты занесены в таблицу 1.

Таблица 1.

$-\psi, ^\circ$	30	50.3	60	70
$\theta_{\max}, ^\circ$	142	90.5	74	59.5
$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}, \frac{e^2}{\pi^2 c} 10^3$	-	59	110	236

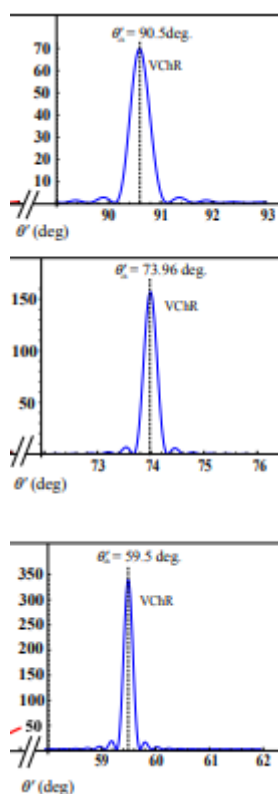


Рисунок 4. Графики из статьи [17] для углов $-\psi = 50.3; 60$ и 70^0 соответственно.

Полученные значения функции и угла соответствуют результатам из статьи (см. рис. 3, 4). При $-\psi = 30^0$ угол $\theta_1 = \theta - \psi$ получился 142^0 . Это означает, что угол $\theta = 112^0 > 90^0$, следовательно, при этом угле ИВЧ полностью отражается внутрь мишени.

2.2 Программа для расчета угла многократного рассеяния

Рассчитаем угол многократного рассеяния, используя распределение Мольера в нулевом приближении, т.е. по формуле 17. Задача осложняется тем, что кварц (SiO_2) является сложным веществом, поэтому отдельно рассчитаем углы многократного рассеяния на атомах кремния и кислорода, а потом усредним по концентрации каждого из атомов.

Сначала необходимо вычислить величину $\aleph^2 B$ по формулам (8) и (9), для этого берем следующие значения величин:

$T=6$ МэВ – энергия пучка электронов;

$m_{e2}=0.51$ МэВ – масса электрона в МэВ;

$m_e=9.1 \cdot 10^{-28}$ г – масса электрона;

Для атомов кремния берем следующие параметры:

$Z_1=14$ – заряд ядра кремния;

$A_1=28$ – атомная масса кремния;

$s_1=0.218 \cdot 2.65$ г/см² – путь частицы в единицах радиационной длины.

Параметры для атомов кислорода:

$Z=8$;

$A=16$;

$s=2 \cdot 0.218 \cdot 2.65$ г/см².

Путь частицы s по определению равен:

$$s = \alpha * R = \frac{t}{r} * R = \frac{t}{r} * r * \rho = t * \rho \quad (19)$$

Где α – количество радиационных длин, пройденное частицей, R – радиационная длина в г/см², r – радиационная длина в см, t – толщина слоя, пройденного электронами (0.218 см), ρ – плотность среды. Для кислорода умножаем путь на 2, т.к. атомов кислорода в молекуле кремния в 2 раза больше, чем атомов кремния, соответственно число столкновений удваивается.

Соответственно получаем для атомов кремния средний угол многократного рассеяния 21.3^0 , для кислорода – 24.0^0 .

Далее находим средний угол с учетом концентрации атомов каждого типа:

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{3}\bar{\vartheta}_{Si} + \frac{2}{3}\bar{\vartheta}_O = 23.1^{\circ} \quad (20)$$

Теперь необходимо проверить правильность расчетов по приближенным формулам 13 и 14. Для этого берем те же параметры и считаем отдельно углы многократного рассеяния для атомов кремния и кислорода. Получаем для кремния – 22.2° , для кислорода – 19.0° . Усреднение производим по формуле 20:

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{3}\bar{\vartheta}_{Si} + \frac{2}{3}\bar{\vartheta}_O = 20.0^{\circ}$$

Таким образом получили достаточное соответствие расчетов среднего угла многократного рассеяния двумя способами.

3. Результаты расчетов и анализ

3.1 Получение и исследование полярного распределения интенсивности ИВЧ при разных углах наклона мишени в системе отсчета, связанной с проходящим пучком электронов, без учета угла многократного рассеяния.

После того как на примере расчета спектрально угловых распределений для мишени из алмаза убедились, что программа дает корректные результаты, были получены распределения интенсивности ИВЧ для энергии томского микротрона и мишени из кварца по полярному углу θ_1 при $\phi = 0^0$ и углу поворота мишени $-\psi$ от 0 до 90 градусов. При расчетах использовались следующие параметры:

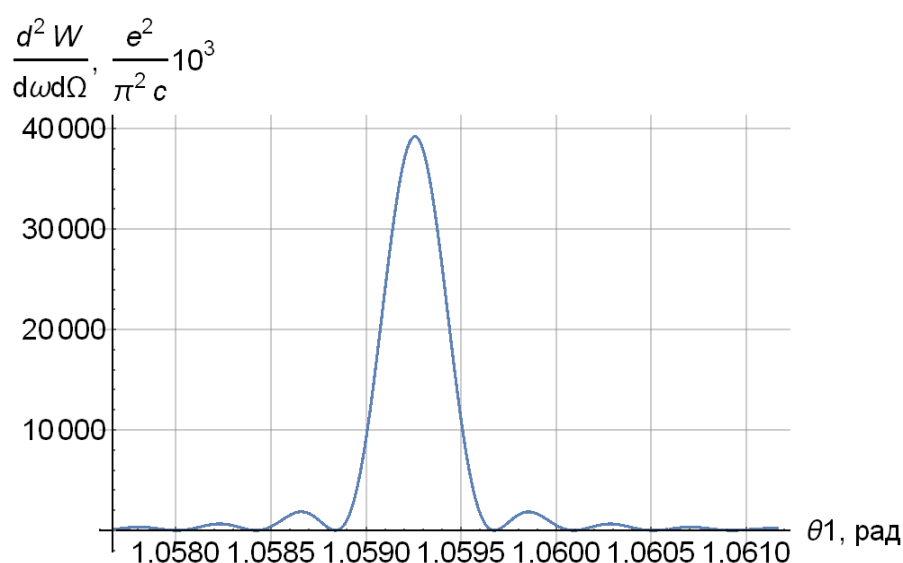
$\xi=1.54^2$ – диэлектрическая проницаемость кварца;

$\lambda=0.5*10^{-6}$ м – длина волны черенковского излучения;

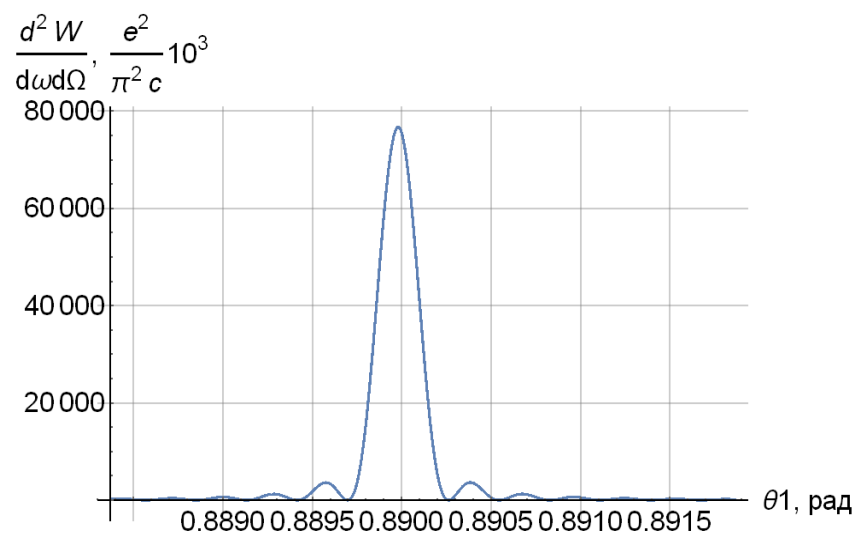
$L=1500*10^{-6}$ м – толщина мишени;

$Eel=6*10^6$ эВ – энергия электронов.

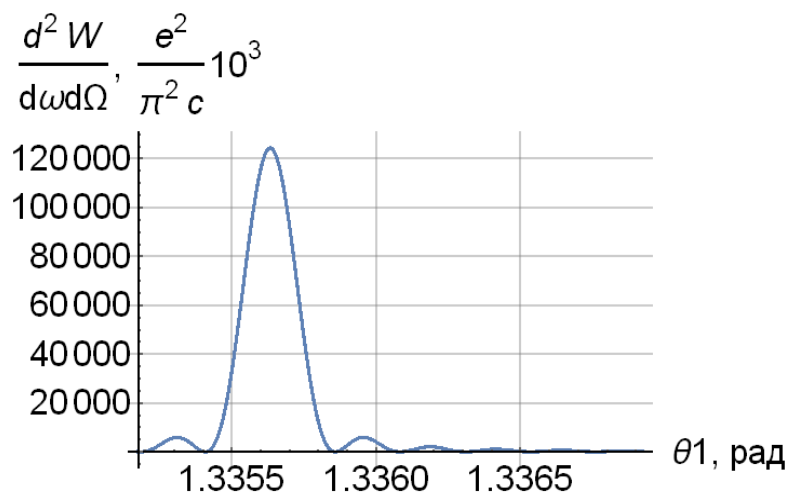
По формуле 18 были получены следующие графики:



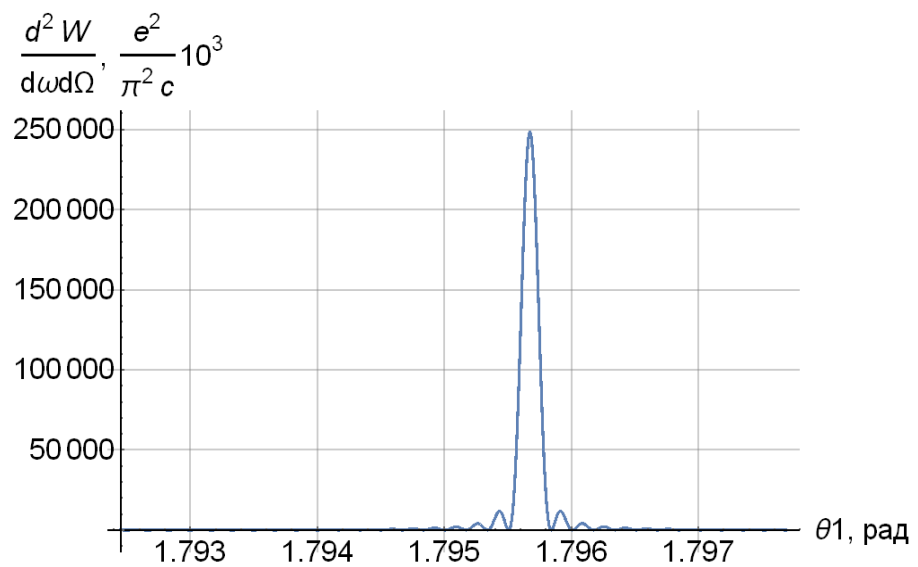
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5. Графики полярного распределения излучения для кварца ($\xi=1.54^2$) при $\phi_1 = 0^0$. Графики а, б, в, г соответствуют углам $-\psi = 30; 50; 60$ и 70^0 .

Далее были рассчитаны значения функции и угла в максимуме при угле поворота мишени $-\psi$ от 0 до 90 градусов. Результаты занесены в таблицу 2.

Таблица 2.

$-\psi, ^0$	$\theta_{1\max}, ^0$	$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} \frac{e^2}{\pi^2 c} 10^3$
0	-	-
5	-	-
10	87.57	8000
15	75.35	21300
20	69.02	28100
25	64.42	33700
30	60.69	39200
35	57.45	45500
40	54.5	53200
45	51.72	63200

50	50.99	76700
55	63.71	95900
60	76.53	124400
65	89.54	169600
70	102.89	248200
75	116.8	404000
80	131.72	791000
85	148.82	2354200
89	168.28	20890000

Для наглядности были построены графики зависимости максимума интенсивности и соответствующего ему полярного угла от угла поворота мишени.

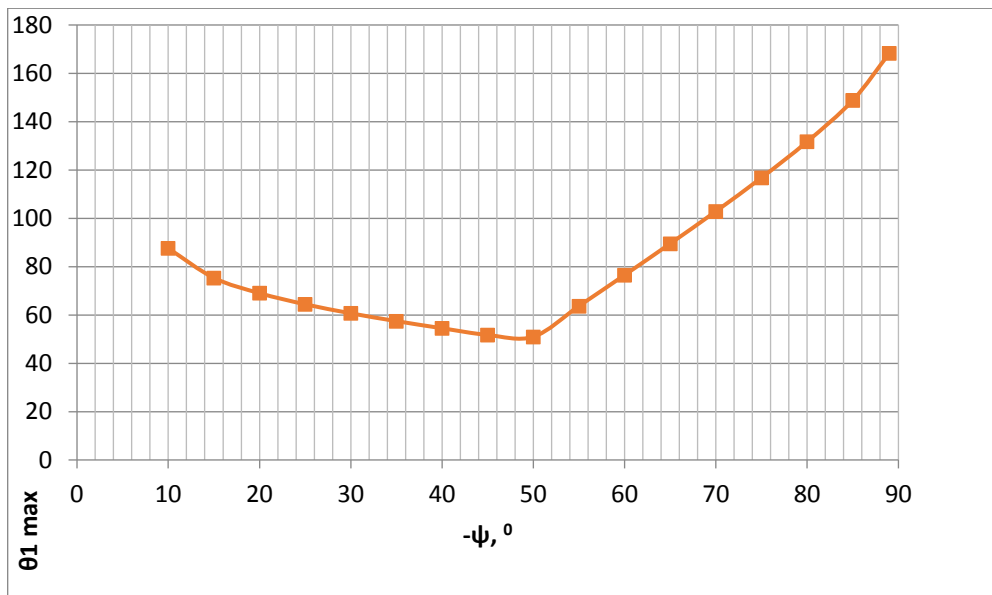


Рисунок 6. График зависимости угла θ_{1max} от угла $-\psi$.

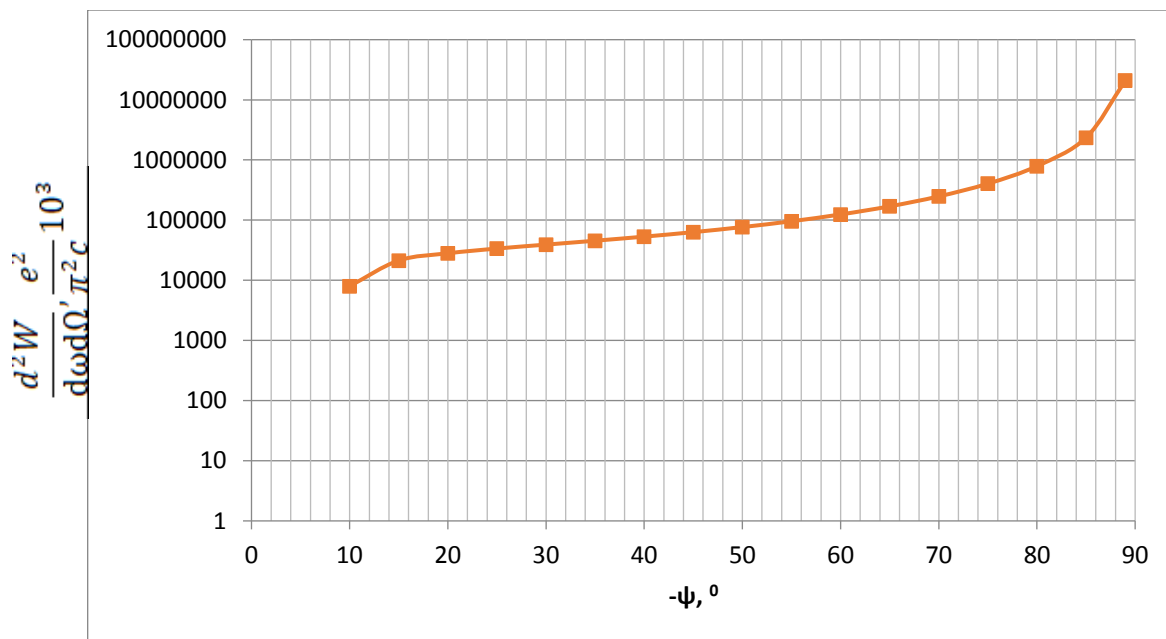


Рисунок 7. График зависимости интенсивности излучения от угла $-\psi$.

При угле наклона мишени близком к черенковскому углу $\theta_{ch}=49.3^\circ$ ИВЧ падает под прямым углом к мишени и выходит под тем же углом, под которым наклонена мишень. Как видно из рисунка 6 при угле наклона мишени меньше θ_{ch} угол выхода ИВЧ уменьшается, при угле больше θ_{ch} угол выхода увеличивается.

По рисунку 7 можно сказать, что интенсивность излучения возрастает при увеличении угла $-\psi$ на всем промежутке. При угле близком к θ_{ch} зависимость

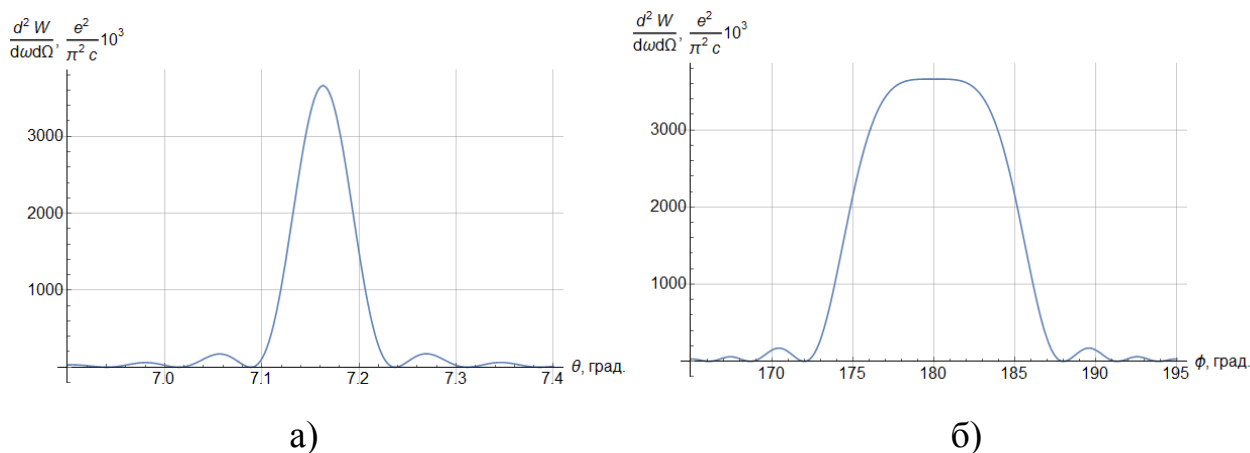
интенсивности от угла наклона экспоненциальная. При угле $-\psi$ меньше 9 градусов интенсивность излучения резко падает до нуля, т.е. происходит отражение ИВЧ внутрь мишени. При угле наклона мишени близком к 90^0 наблюдается резкий рост интенсивности излучения. Это может быть связано с резким увеличением толщины пластины. В данной работе рассматривалась пластина бесконечной длины и ширины.

3.2 Получение и исследование трехмерного распределения интенсивности ИВЧ при заданном угле наклона мишени.

Теперь получим распределение интенсивности ИВЧ по азимутальному и полярному углам. Расчеты будем производить для пучка электронов с энергией 6 МэВ, проходящего через кварцевую мишень толщиной 0.3 мм. Угол наклона мишени относительно пучка – 54^0 .

Для получения распределения интенсивности по двум углам удобно провести расчеты в системе отсчета, связанной с мишенью, а потом перейти в систему, связанную с пучком.

По формуле 6 построим графики распределения ИВЧ по полярному углу при разных значения азимутального угла и распределения по азимутальному углу при полярном угле в максимуме:



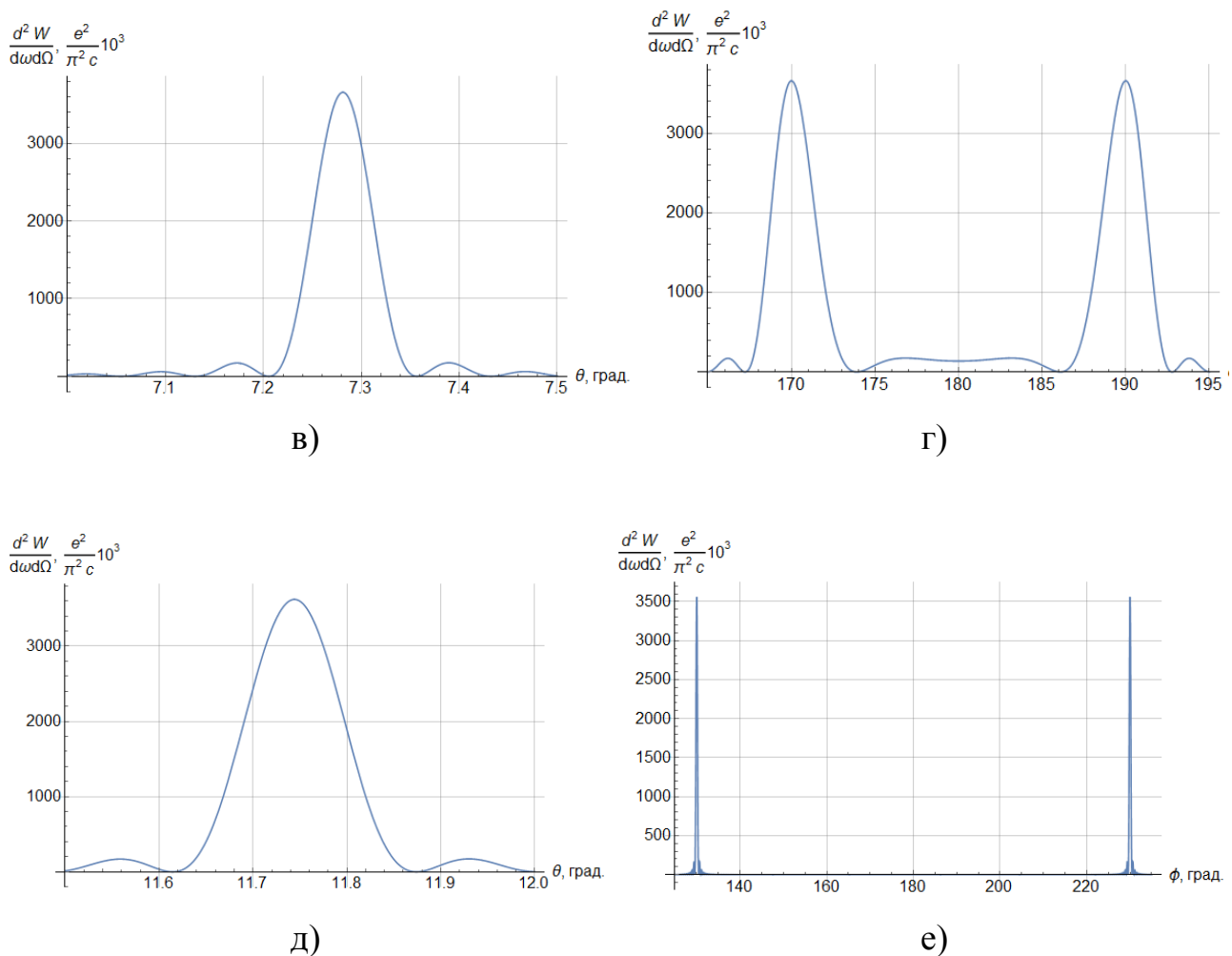


Рисунок 8. Графики полярного распределения излучения при значениях азимутального угла 180° (а), 170° (в) и 130° (д) и соответствующего им азимутального распределения при полярном угле в максимуме (б, г, е) в СО связанной с мишенью.

Точно такие же распределения получают при отклонении по азимутальному углу в другую сторону от 180° . По рисунку 8 можно сказать, что при увеличении отклонения от 180° по азимутальному углу ширина пика увеличивается и максимум интенсивности сдвигается в сторону увеличения полярного угла. Величина максимума незначительно уменьшается. По азимутальному углу происходит разделение пиков интенсивности. Ширина пиков по азимутальному углу на порядок больше, чем по полярному.

Чтобы более подробно изучить поведение максимумов интенсивности были построены трехмерные графики максимумов интенсивности. Для этого для

каждого значения полярного угла от 90^0 до 270^0 с шагом 0.1^0 были найдены максимальные значения интенсивности и соответствующие им значения полярного угла. Далее по полученным значениям был построен массив и следующий график:

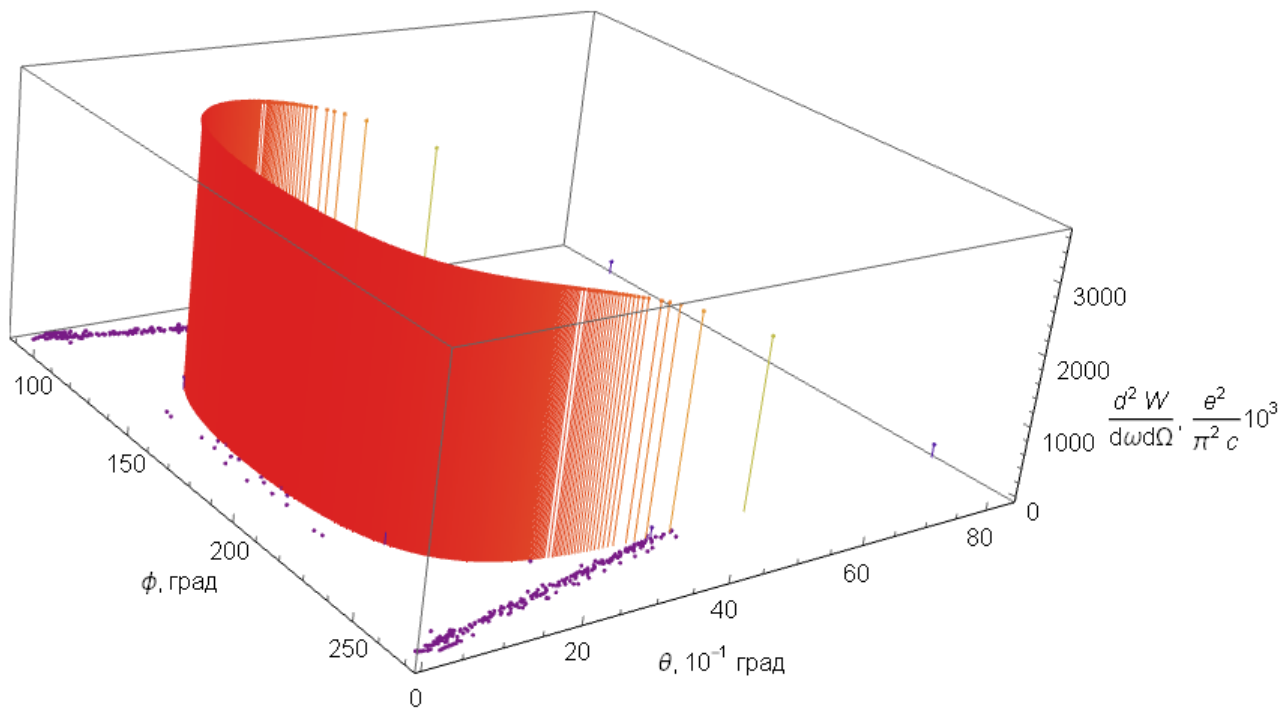


Рисунок 9. График зависимости максимума интенсивности ИВЧ от полярного и азимутального углов в СО связанной с мишенью.

По рисунку 9 видно, что при отклонении от 180^0 по азимутальному углу интенсивность в максимуме уменьшается, распределение симметрично по азимутальному углу. Максимум интенсивности резко падает от $2925 \frac{e^2}{\pi^2 c} 10^3$ до $142 \frac{e^2}{\pi^2 c} 10^3$ в промежутке от 110.3^0 до 110.2^0 по азимутальному углу и далее падает почти до 0 (фиолетовые точки на графике).

Далее построим распределение максимума интенсивности по направляющим косинусам n_x и n_y . Для этого воспользуемся формулой 5.

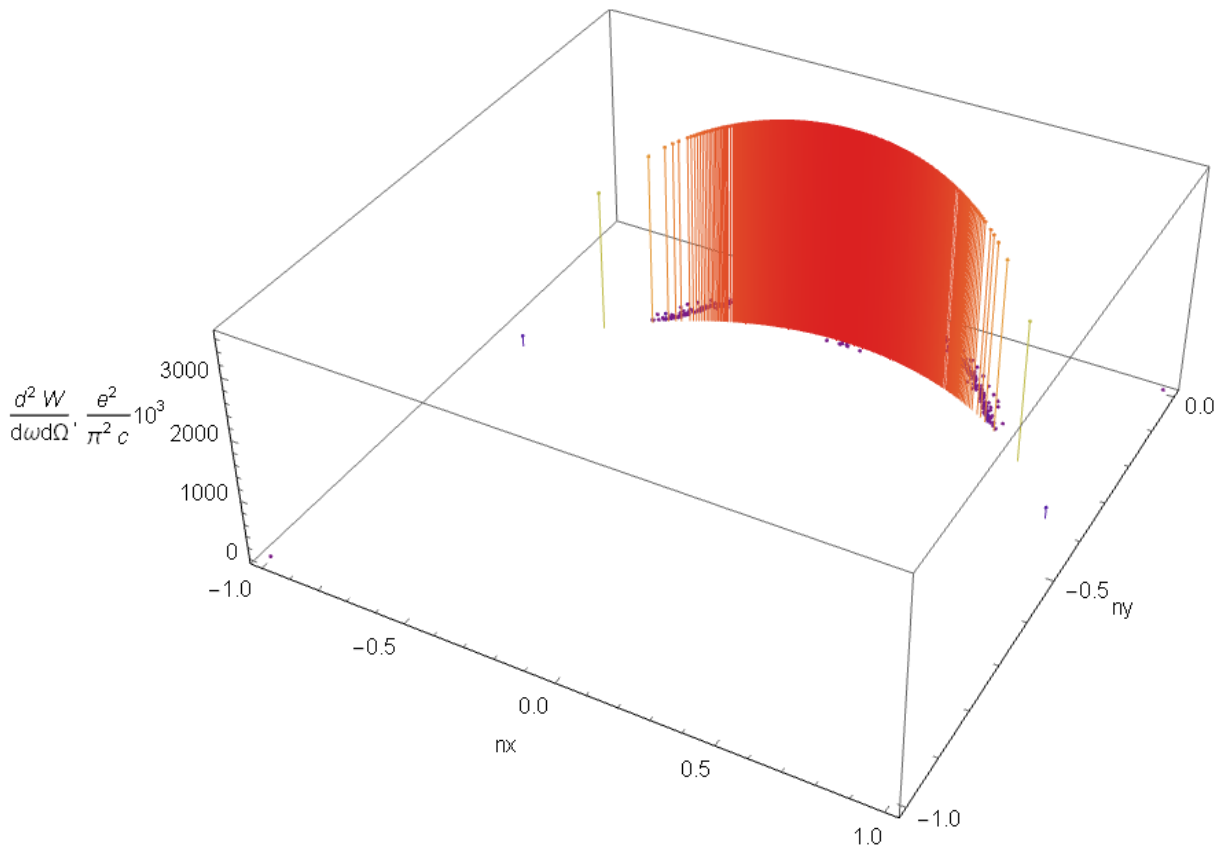


Рисунок 10. График зависимости максимума интенсивности ИВЧ от направляющих косинусов n_x и n_y в СО связанной с мишенью.

Все расчеты в этой главе проводились в системе отсчета, связанной с мишенью. Далее перейдем в систему отсчета, связанную с пучком электронов, и получим аналогичные трехмерные распределения в этой системе. Для этого воспользуемся формулами:

$$\cos(\theta') = \cos(\theta) \cos(\psi) - \sin(\theta) \cos(\varphi) \sin(\psi) \quad (21)$$

$$\tan(\varphi') = \frac{\sin(\theta) \sin(\varphi)}{\sin(\theta) \cos(\varphi) \cos(\psi) + \cos(\theta) \sin(\psi)} \quad (22)$$

$$N_x = n_x \quad (23)$$

$$N_y = n_y \cos(\psi) + n_z \sin(\psi) \quad (24)$$

После того как произвели замену получили следующие графики:

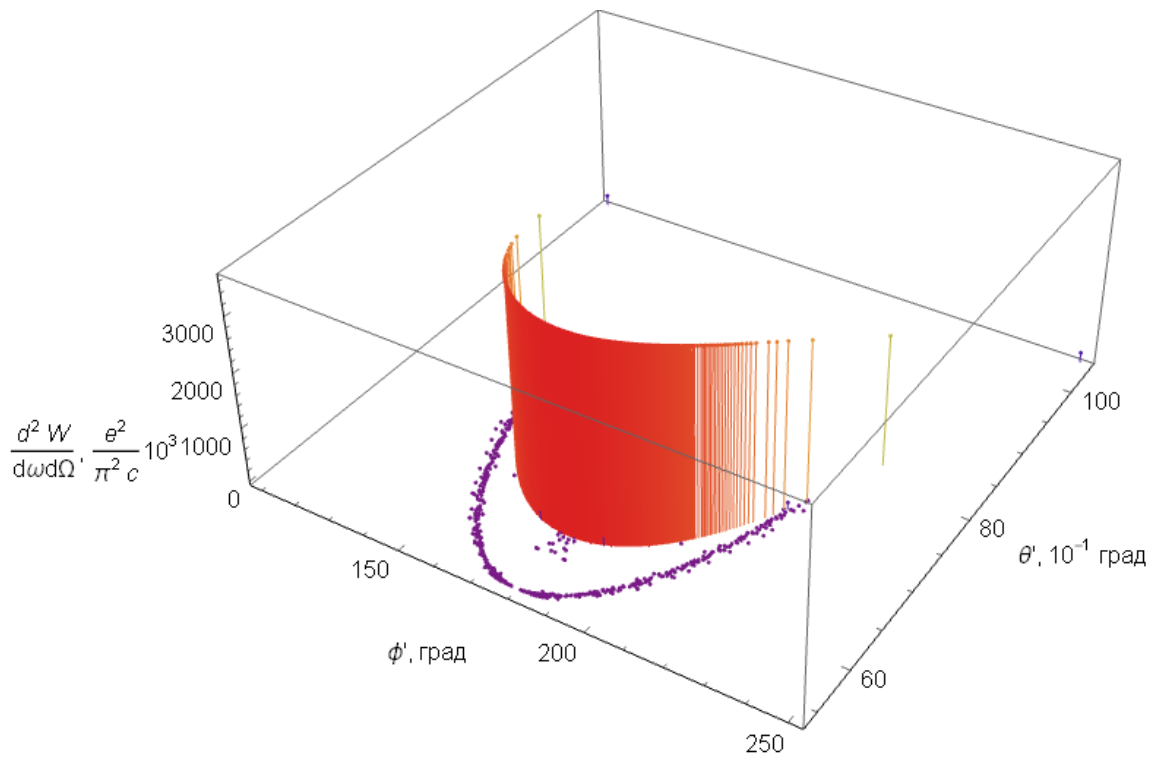


Рисунок 11. График зависимости максимума интенсивности ИВЧ от полярного и азимутального углов в СО связанной с пучком.

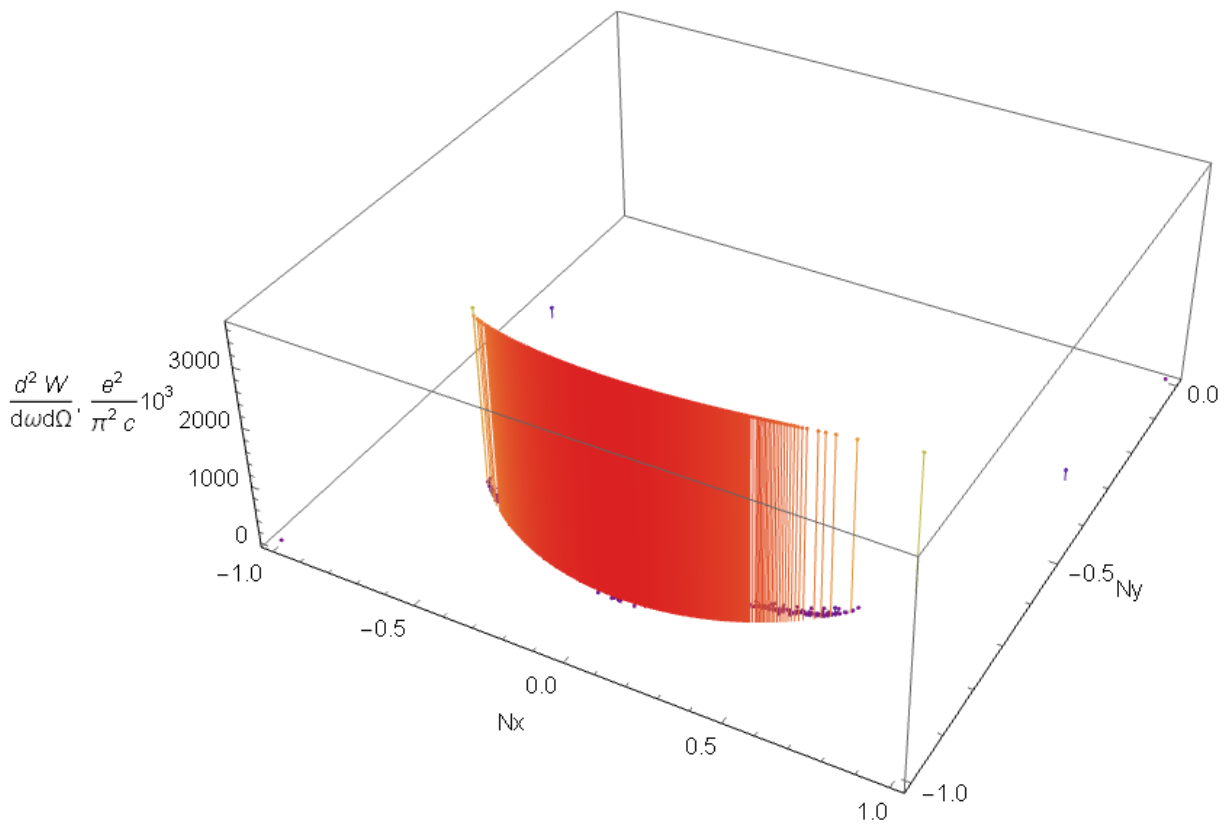


Рисунок 12. График зависимости максимума интенсивности ИВЧ от направляющих косинусов N_x и N_y в СО связанной с пучком.

3.3 Получение полярного распределения интенсивности ИВЧ при заданном угле наклона мишени с учетом угла многократного рассеяния.

В предыдущей главе были получены распределения ИВЧ по полярному и азимутальному углу. Однако, при расчетах не было учтено рассеяние электронов на атомах мишени. Чтобы это учесть рассчитаем угол многократного рассеяния и получим полярное распределение интенсивности при азимутальном угле равном 180 градусов. Расчеты будем производить для пучка электронов с энергией 6 МэВ, проходящего через кварцевую мишень толщиной 0.3 мм. Угол наклона мишени относительно пучка – 54° .

По формулам 7, 8 и 20 получаем, что угол многократного рассеяния электронов для такой мишени на половинной толщине равен $\theta_{ms}=5.2^{\circ}$. Чтобы его учесть воспользуемся сверткой распределения интенсивности ИВЧ в системе отсчета связанной с мишенью (формула 6) с распределением по углу многократного рассеяния в нулевом приближении (формула 11). Заметим, что форма распределения по формуле по углу многократного рассеяния такая же как у распределения Гаусса, поэтому добавим в качестве нормировочного коэффициента $\frac{1}{\sqrt{\pi}\theta_{ms}}$ и произведем свертку двух распределений по углу θ :

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \int_0^{\infty} F(x, \varphi, \psi) \frac{e^{-\frac{(\theta-x)^2}{\theta_{ms}^2}}}{\sqrt{\pi}\theta_{ms}} dx \quad (25)$$

Здесь $F(\theta, \varphi, \psi)$ – функция распределения интенсивности ИВЧ в системе отсчета, связанной с мишенью.

Воспользуемся формулой 25 и построим график распределения интенсивности ИВЧ по полярному углу:

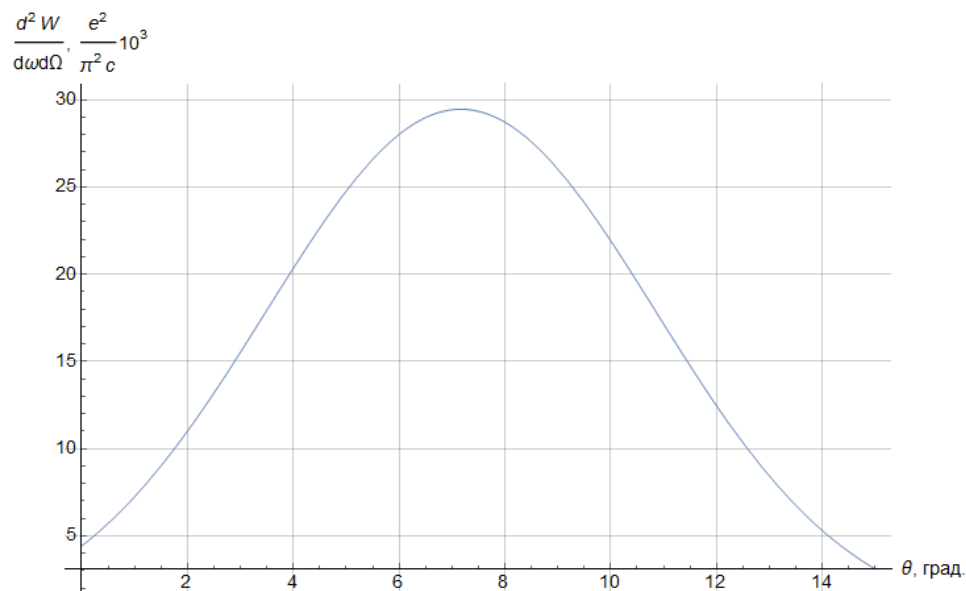


Рисунок 13. График полярного распределения излучения для кварца ($\xi=1.54^2$) при $\phi = 180^0 - \psi = 54^0$ с учетом угла многократного рассеяния в системе отсчета, связанной с мишенью.

Таким образом, за счет рассеяния электронов на атомах мишени интенсивность излучения падает, пик при этом уширяется, а положение максимума интенсивности остается неизменным.

Далее перейдем в систему отсчета, связанную с пучком. Для этого, как и в предыдущем случае сделаем свертку формулы 18 и 11. В результате получим следующий график:

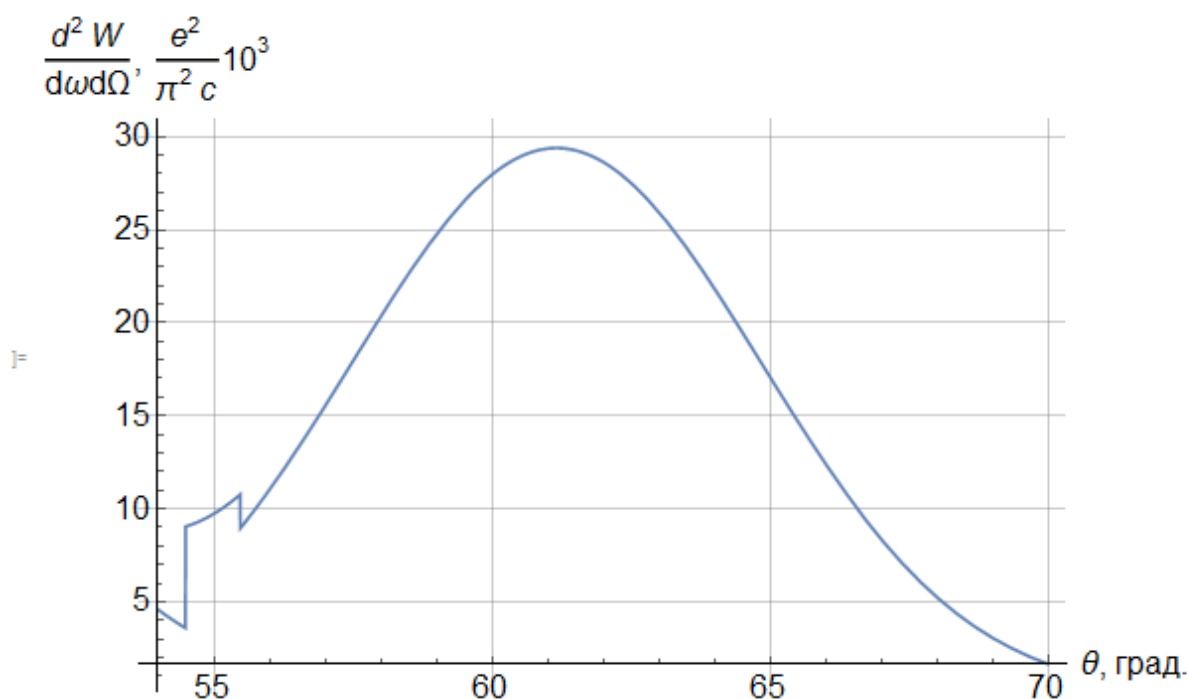


Рисунок 14. График полярного распределения излучения для кварца ($\xi=1.54^2$) при $\phi = 180^\circ - \psi = 54^\circ$ с учетом угла многократного рассеяния в системе отсчета, связанной с пучком.

График получился немного неровным, т.к. не хватило вычислительной мощности.

3.4 Получение полярного распределения интенсивности ИВЧ и получение угла наклона мишени при известном угле расположения детектора.

В этой главе рассмотрим следующую задачу: найти угол наклона мишени, при котором максимум интенсивности излучения будет попадать на детектор. Детектор расположен под углом 30° к пучку электронов. Известно, что энергия пучка электронов 1 ГэВ, толщина кварцевых мишеней 1 и 4 мм.

По формулам 7, 8 и 20 получаем, что угол многократного рассеяния электронов на половинной толщине для мишени толщиной 1 мм равен $\theta_{ms1}=0.066^\circ$, для 4 мм $\theta_{ms2}=0.142^\circ$.

Далее подбираем по формуле 18 графическим методом подбираем такой угол наклона мишени, чтобы максимум интенсивности приходился на 30° . В результате получим следующее распределение при угле наклона мишени 19.78° :

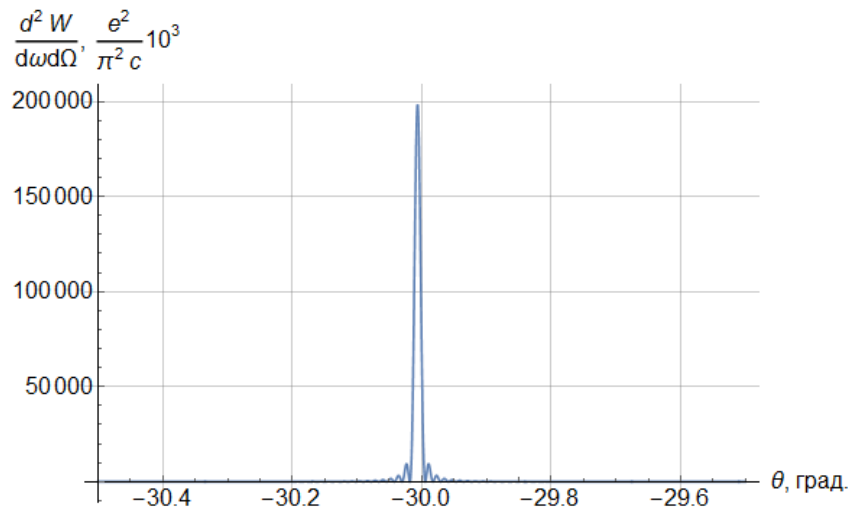


Рисунок 15. График полярного распределения излучения для кварцевой мишени толщиной 4 мм при $\phi = 180^\circ - \psi = 19.78^\circ$.

С учетом угла многократного рассеяния распределение приобретает вид:

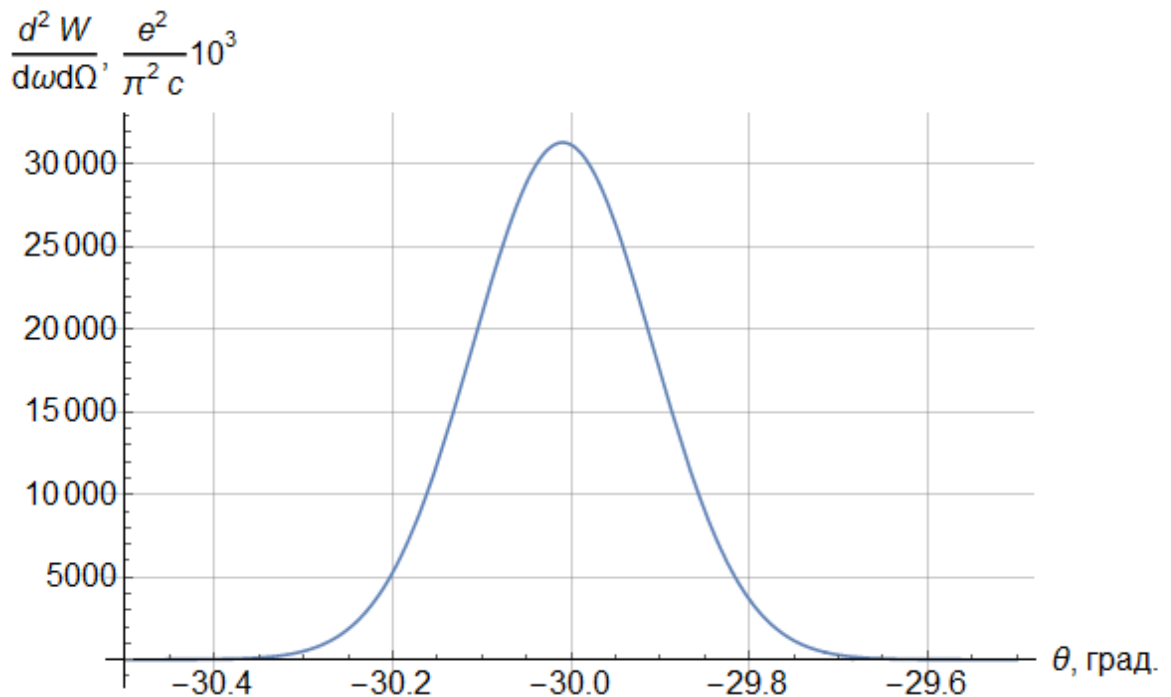


Рисунок 16. График полярного распределения излучения для кварцевой мишени толщиной 4 мм при $\phi = 180^\circ - \psi = 19.78^\circ$ с учетом угла многократного рассеяния.

Получим аналогичные графики для мишени толщиной 1 мм:

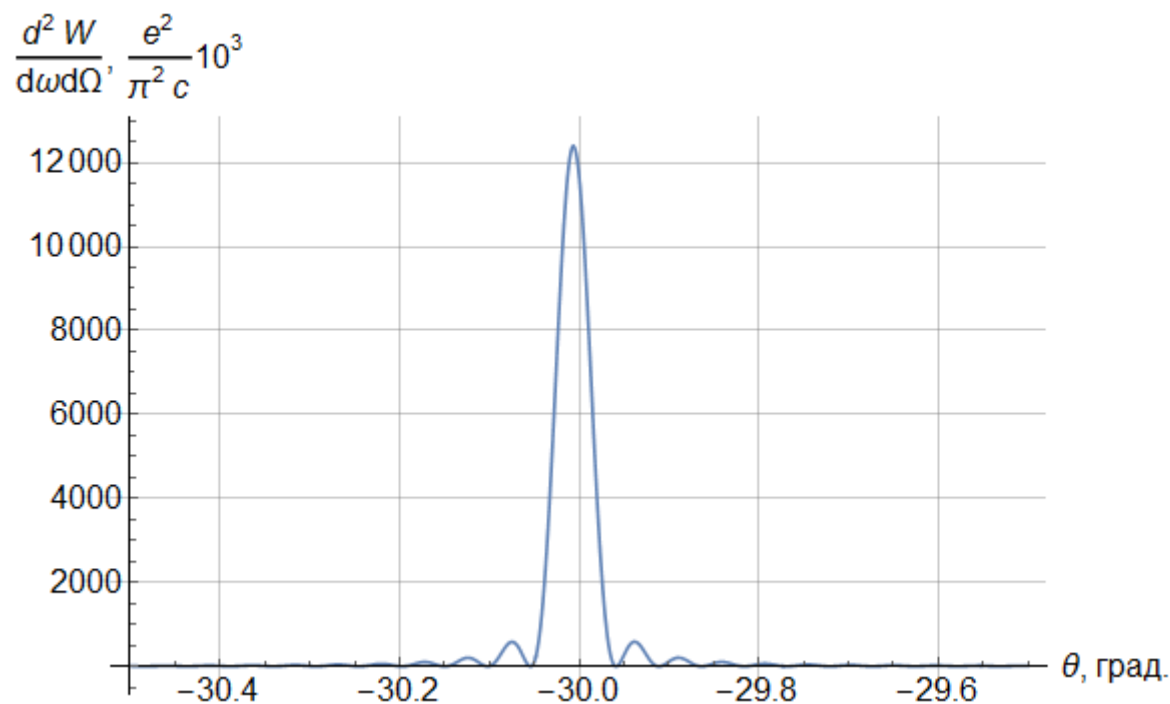


Рисунок 17. График полярного распределения излучения для кварцевой мишени толщиной 1 мм при $\phi = 180^\circ - \psi = 19.78^\circ$.

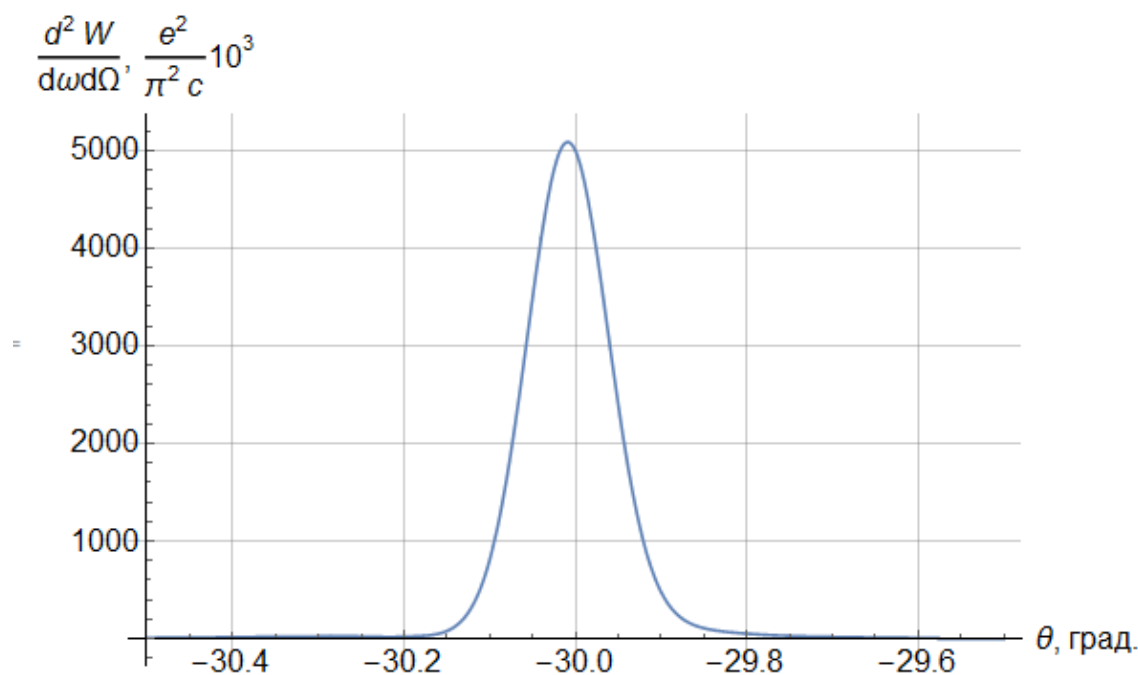


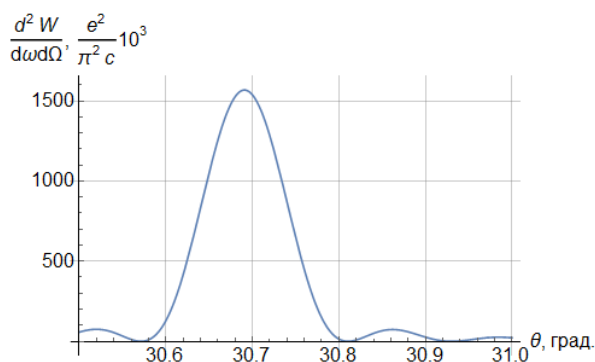
Рисунок 18. График полярного распределения излучения для кварцевой мишени толщиной 1 мм при $\phi = 180^\circ - \psi = 19.78^\circ$ с учетом угла многократного рассеяния.

Таким образом, при увеличении толщины мишени угол многократного рассеяния увеличивается, за счет этого ширина пика увеличивается. Интенсивность в максимуме увеличивается, положение максимума остается неизменным.

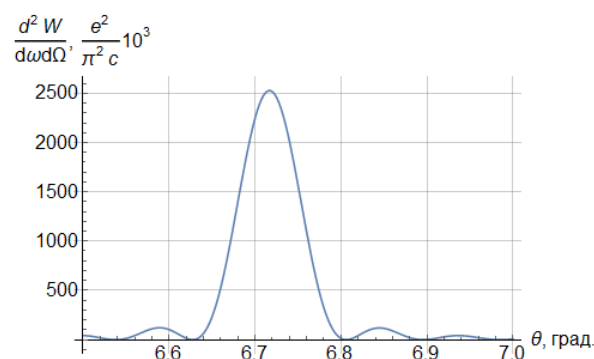
Получение таких графиков может быть использовано для нахождения расходимости пучка. Для этого необходимо сравнить полуширину пика на полувисоте графика, полученного в эксперименте и путем моделирования. Разность этих величин будет расходимостью пучка.

3.5 Исследование полярного и азимутального распределения интенсивности ИВЧ при разных углах наклона мишени.

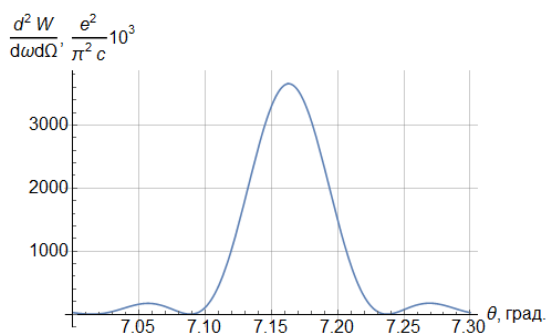
В этой главе рассмотрим зависимость ширины и высоты пика, а также границы по азимутальному углу при изменении угла наклона мишени. Расчеты будем производить для пучка электронов с энергией 6 МэВ, проходящего через кварцевую мишень толщиной 0.3 мм. Рассмотрим следующие углы наклона мишени: $-\psi = 30, 45, 54$ и 70° . По формуле 6 получим полярные распределения для этих углов:



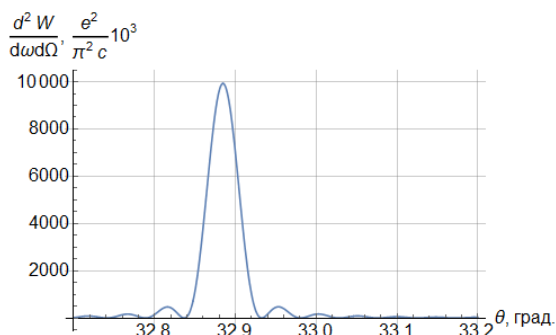
а)



б)



в)

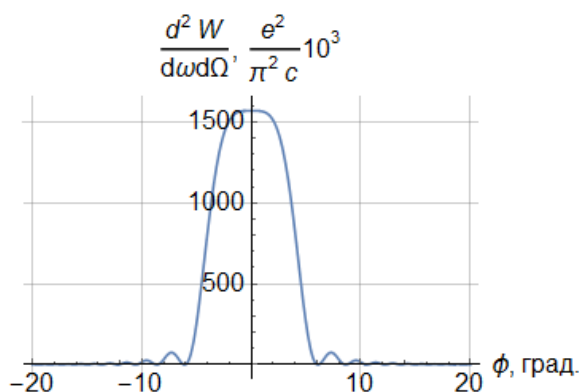


г)

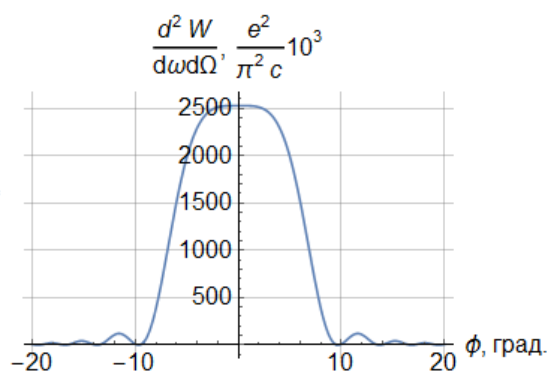
Рисунок 19. Графики полярного распределения излучения при $\begin{cases} \phi = 0, \text{ при } -\psi < \theta_{ch} \\ \phi = \pi, \text{ при } -\psi \geq \theta_{ch} \end{cases}$. Графики а, б, в, г соответствуют углам $-\psi = 30; 45; 54$ и 70^0 .

По рисунку 19 видно, что при приближении угла наклона мишени к черенковскому углу $\theta_{ch} = 49.3^0$ ширина пика по полярному углу увеличивается. Максимум интенсивности возрастает при увеличении угла наклона мишени, а полярный угол, соответствующий максимуму, уменьшается при приближении угла наклона мишени к черенковскому углу.

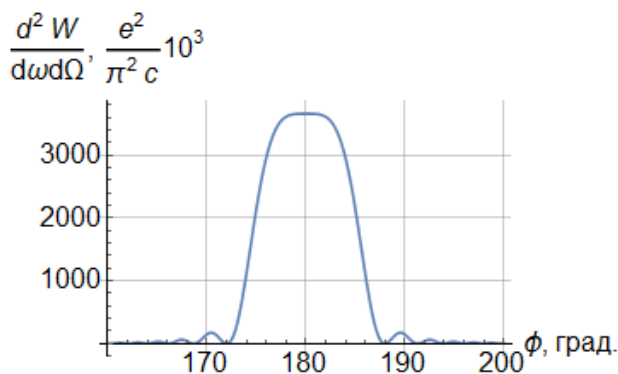
Теперь рассмотрим, как изменяется ширина пика азимутального распределения интенсивности ИВЧ. Для этого построим азимутальные распределения при полярных углах, соответствующих максимуму интенсивности:



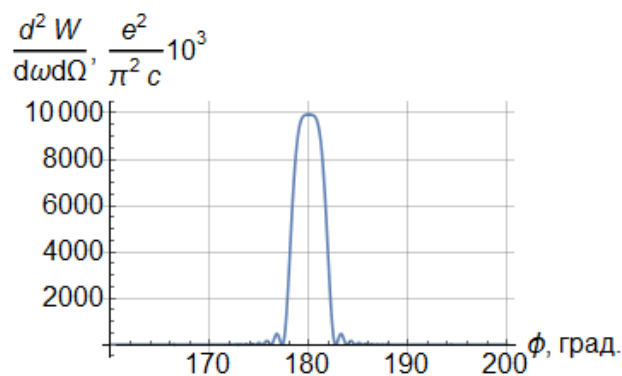
а)



б)



в)

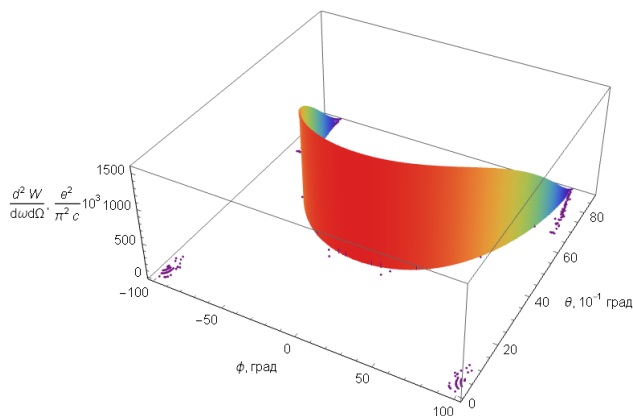


г)

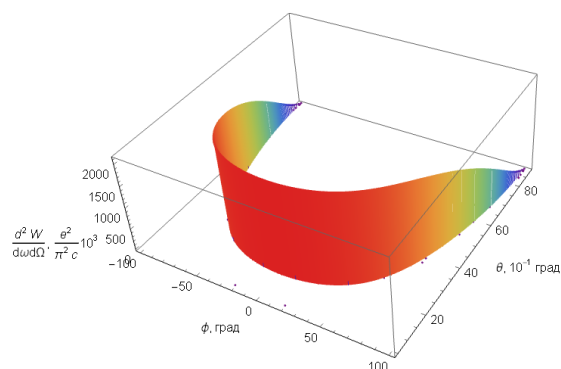
Рисунок 20. Графики азимутального распределения излучения при полярных углах, соответствующих максимуму интенсивности. Графики а, б, в, г соответствуют углам $-\psi = 30; 45; 54$ и 70° .

Из рисунка 20 видно, что при приближении угла наклона мишени к черенковскому углу $\theta_{ch} = 49.3^\circ$ ширина пика по азимутальному углу увеличивается.

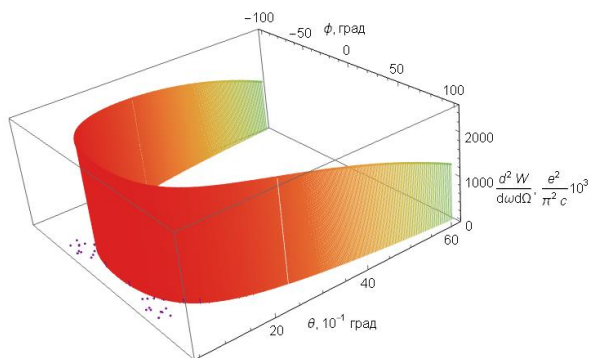
Далее построим трехмерные распределения интенсивности ИВЧ по полярному и азимутальному углам:



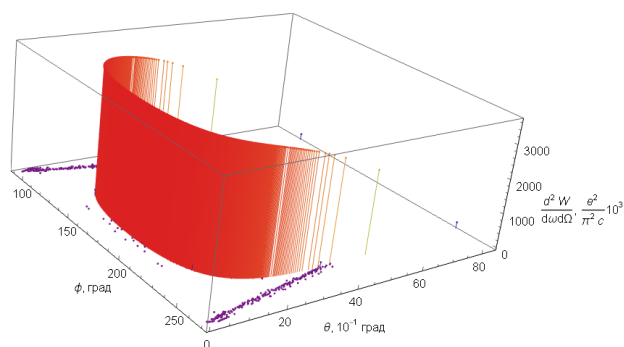
а)



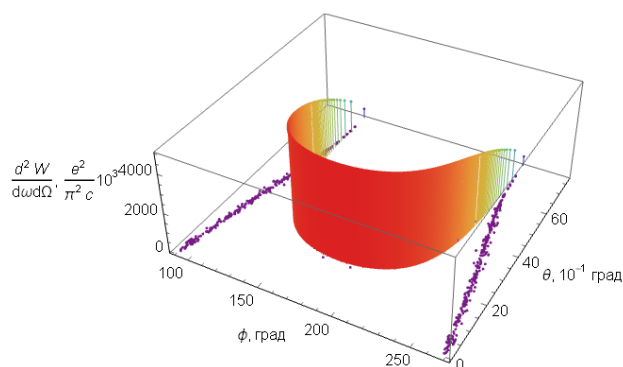
б)



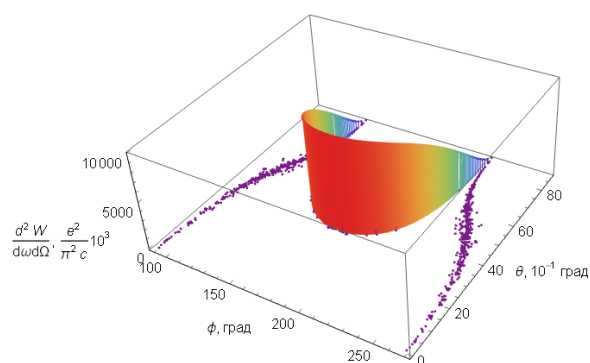
в)



г)



д)



е)

Рисунок 21. График зависимости максимума интенсивности ИВЧ от полярного и азимутального углов в СО связанной с пучком. Графики а, б, в, г, д, е соответствуют углам $-\psi = 30; 40; 45; 54; 60$ и 70^0 .

Из рисунка 21 видно, что при $-\psi < \theta_{ch}$ при увеличении угла наклона мишени спад интенсивности при увеличении азимутального угла становится более плавным. Границы по азимутальному углу расширяются. При $-\psi \geq \theta_{ch}$ при увеличении угла наклона мишени спад интенсивности при увеличении азимутального угла сначала очень резкий, потом становится более плавным. Границы по азимутальному углу уменьшаются.

4. Социальная ответственность

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

Профилактическая работа основывается на непрерывном и эффективном контроле и оценке действий по улучшению, совершенствованию и развитию системы управления охраной труда.

Охрана труда – это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда.

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда – свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором согласно [20] называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

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

4.1 Анализ опасных и вредных факторов

Таблица 3– Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ [21]		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с компьютером	Электромагнитное излучение Шум Вибрация	-	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» (с изменениями на 21.06.2016) [26]
	-	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [23]
	-	Пожарная опасность	Правила противопожарного режима в Российской Федерации [27]

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

Дипломная работа была выполнена на кафедре ПФ ФТИ. Работа выполнялась с использованием современной вычислительной техники, что позволило достичь высокой эффективности процесса и уменьшения временных затрат на его проведение.

На инженера, который работает на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

– должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Организация рабочего места показана на рис. 23.

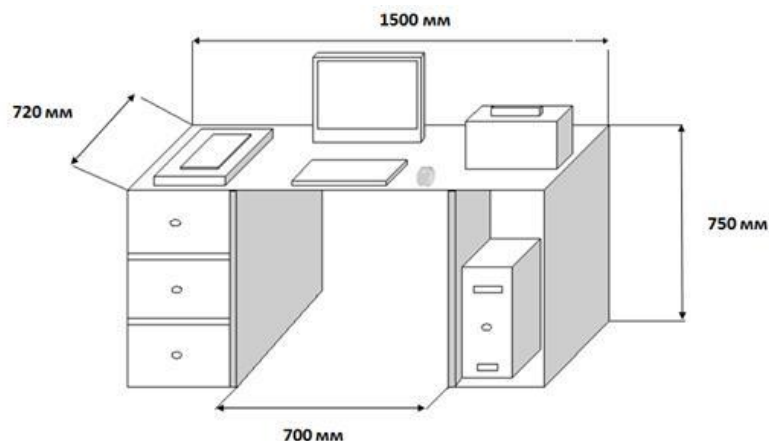


Рисунок 23 – Схема организации рабочего места

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

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

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение

на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

4.2.2 Условия безопасной работы

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

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата и приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Оптимальные параметры микроклимата

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

Таблица 5 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С		Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже допустимого	Диапазон выше допустимого		Для диапазона ниже допустим	Для диапазона выше допустим
Холодный	20,0-21,9	24,1-25,0	15-75	0,1	0,1
Тёплый	21,0-22,9	25,1-28,0	15-75	0,1	0,2

Температура – степень нагретости воздуха в рабочем помещении. По закону при восьмичасовом рабочем дне температура воздуха в офисном помещении должна составлять 23-25°C в теплое время года и 22-24 °С в холодное (при относительной влажности 40-60%). Отклонение от нормы разрешено лишь на 1-2 °С. Допустимое колебание температуры во время рабочего дня – не больше 3-4 °С [21].

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. При объеме помещения до 20 м³ в него должно подаваться, не менее 30 м³/ч наружного воздуха на одного человека. В случае объема помещения более 40 м³ на одного человека допускается естественная циркуляция, но с учетом отсутствия выделения вредных веществ.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что подача приточного воздуха идет в помещения без предварительной очистки и подогрева.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

В ГОСТе [21] приведены следующие значения уровня шума в помещениях офисов, проектных и научно-исследовательских организаций:

- допустимый уровень – 45 дБ;
- максимальный уровень – 60 дБ;

- оптимальный уровень – 50 дБ.

При выполнении работы на ЭВМ уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [21] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Мощность дозы облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [21] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных ламп.

Согласно требованиям [22] освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

4.2.3 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Основными причинами поражения человека электрическим током при работе с компьютером являются:

- присоединение к незаземленным частям электроустановки (контакты, провода, зажимы и т.д.);
- ошибочно поданное напряжение на рабочее место;
- появление напряжения на корпусе оборудования, которое в нормальных условиях не находится под напряжением;

Влияние электрического тока на организм человека носит разносторонний характер, и может привести как к легкому, так и к тяжелому исходу.

Проходя через организм человека, электрический ток оказывает термическое и биологическое действия:

- нагрев тканей вплоть до ожогов;
- разложение крови и плазмы – нарушение физико-химического состава;
- возбуждение тканей организма (судороги).

Действие тока может привести к электрической травме.

Таким образом, действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение – электрический удар, представляет

для человека наибольшую опасность: нарушается работа центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Степень опасности и исход поражения электрическим током зависят от ряда причин. Основными из них являются: величина тока, проходящего через организм; путь прохождения тока; продолжительность действия тока; частота тока и сопротивление человека в момент соприкосновения с токоведущими частями, которые, в свою очередь, зависят от состояния окружающей среды (температура, влажность воздуха и т.д.).

Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

Помещение, в котором проводится работа, относится к группе помещений без повышенной опасности: сухое (влажность воздуха не превышает 75%), не жаркое (температура не превышает 28°C), с токонепроводящими полами, без токопроводящей пыли и химически активной среды. Все провода, подводящие напряжение к электрооборудованию, электроизолированы и находятся в заземленной металлической оплетке. Рубильник распределительного щитка имеет пластмассовый кожух. Также имеются отключающие автоматы. Выполнен контур защитного заземления из стальной полосы сечением 30 мм² по периметру помещения. Все электрические приборы в лаборатории заземлены.

Согласно [23] заземляющее устройство должно иметь в любое время года сопротивление не более 0,4 Ом.

Для предотвращения появления статического электричества и защиты от его влияния в помещении необходимо использовать нейтрализаторы и увлажнители, а полы должны иметь антистатическое покрытие. Конструкция пола в помещении обеспечивает сток и отвод статического электричества. Покрытие пола выполнено из гладких, прочных, обладающих антистатическими свойствами материалов.

4.2.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [24], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, так как содержит твердые сгорающие вещества.

Возможные причины загорания:

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

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

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

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

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

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

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

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы.

Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями [25] таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а

также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара.

Согласно требованиям пожарной безопасности, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3 – огнетушители переносные порошковые, лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не только масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Целью данной главы является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

5.1. Предпроектный анализ

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования являются полученные данные о свойствах пучка, таких как ориентация пучка относительно направления движения, размеры пучка, определение угла наклона мишени.

Сегментировать рынок услуг можно по следующим критериям: мониторинг пучков, научно-исследовательская работа.

Таблица 6 – Карта сегментирования рынка услуг

		Организации		
		Службы безопасности и контроля	Исследовательские центры	Медицинские учреждения
Область применения	Радиационная терапия			
	Научно-исследовательская работа			
	Элементный анализ			

Из карты сегментирования услуг видно, что целевым рынком данного исследования будут исследовательские центры.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Был проведен детальный анализ конкурентных разработок, применяемых и существующих на данный момент. Детальный анализ необходимо проводить систематические из-за динамического характера рынка. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы обладать большей конкурентоспособностью. Так же необходимо оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Для этой цели может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

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

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 7. В этой таблице сравнивается техническая ресурсоэффективность и экономическая эффективность разработки метода диагностики электронных пучков с помощью излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) с другими конкурентными методами:

Бф – Диагностика пучка с помощью Черенковского излучения с наклонной мишенью;

Бк1 – Диагностика пучка с помощью Черенковского излучения без наклонной мишени;

Бк2 – Диагностика пучка с помощью переходного излучения с наклонной мишенью;

Бк3 – Диагностика пучка с помощью переходного излучения без наклонной мишени;

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы (маx 5)				Конкурентоспособность			
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	Б _{к3}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}	К _{к3}
1. Информативность применяемой методики	0,15	3	3	4	4	0,45	0,45	0,6	0,6
2. Точность полученных данных о профиле пучка	0,20	4	4	5	5	0,8	0,8	1	1
3. Влияние на пучок объект	0,15	3	4	3	4	0,45	0,6	0,45	0,6
4. Требования к регистрирующим устройствам	0,10	5	5	4	4	0,5	0,5	0,4	0,4
5. Сложность конструкции	0,2	5	3	5	3	1	0,6	1	0,6
7. Стоимость внедрения	0,2	4	3	5	4	0,8	0,6	1	0,8
Итого:	1	24	22	26	24	4	3,55	4,45	4

Из таблицы 7 видно, что метод диагностики пучка с помощью Черенковского излучения с наклонной пластиной уступает методу, основанному на переходном излучении с наклонной пластиной. Несмотря на это, два метода могут быть использованы параллельно для получения более точной информации о характеристиках пучка.

5.1.3 SWOT-анализ

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

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное

преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

SWOT-анализ данного научно-исследовательского проекта представлен в таблице 8.

Таблица 8 — SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны:</p> <p>C1: Соответствие теоретических расчетов экспериментальным данным</p> <p>C2: Удобство измерения угловых характеристик пучка</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>СЛ1: Изменение характеристик пучка в результате измерения, что сказывается на точности измерения характеристик</p> <p>СЛ2: Малоизученность метода</p>
--	---	---

	<p>С3: Невысокая стоимость реализации</p> <p>С4: Простота вычислений</p>	
<p>Возможности:</p> <p>В1: Расширение границ использования данного метода.</p> <p>В2: Улучшение метода измерения для уменьшения влияния погрешности.</p> <p>В3: Доп. изучение области применения данного метода.</p> <p>В4: Написание и публикация статей о полученных результатах.</p>	<p>1) Одна из возможностей расширения границ применения метода это определение направления высокоэнергетичных бета частиц по угловому распределению Черенковского излучения. Может быть использовано, например при создании дозиметра.</p> <p>2) Уменьшение влияния погрешности измерения позволит использовать данный метод для диагностики низкоэнергетических пучков</p>	<p>1) Необходима модернизация метода для уменьшения погрешности измерения, возникающей в следствии изменения характеристик пучка, при взаимодействии с мишенью</p> <p>2) Более подробное изучение данного метода позволит расширить границы применения метода и откроет новые возможности для его модернизации</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1: Узкий диапазон применения метода.</p> <p>У2: Отсутствие финансирования</p>	<p>Удобство измерения и низкая стоимость делают этот метод привлекательным в рамках диапазона его применимости</p>	<p>Существенные погрешности и узкий диапазон применения делают данный метод непривлекательным по сравнению с другими. Поэтому необходимо подробное исследование</p>

		данного метода для устранения его слабых сторон
--	--	---

5.2. Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. Цели и результат проекта. В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представить в табл. 9.

Таблица 9

Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Научно-исследовательские центры	Разработка метода измерения угловых характеристик пучка электронов
Медицинские центры	

Далее необходимо представить информацию о иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 10

Цели и результат проекта

Цели проекта:	Освоить подход, основанный на методе изображений и написать код, пригодный для расчета характеристик ИВЧ от пластин любой толщины с заданным коэффициентом преломления.
Ожидаемые результаты проекта:	Получение угловых распределений ИВЧ для кварцевых пластин заданной толщины, при энергии электронов 6 МэВ.
Критерии приемки результата проекта:	Возможность применения полученных формул для предсказания результатов эксперимента
Требования к результату проекта:	Требование:
	Соответствие распределений по интенсивности в системе отсчета, связанной с пучком и распределения из статьи [12]
	Соответствие распределений по интенсивности для одинаковых углов в системах отсчета, связанных с пучком и мишенью
	При учете многократного рассеяния полуширина пика должна быть порядка среднего угла многократного рассеяния
	Полученное в результате расчета угловое распределение должно быть согласовано с полученным экспериментально

2. Организационная структура проекта. На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в табличной форме (табл. 11).

Таблица 11

Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
	Потылицын Александр Петрович, Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, Ведущий научный сотрудник	Руководитель проекта	Координирует деятельность участников проекта	48
	Атовуллаев Тимур, Инженерная школа ядерных технологий, магистрант	Исполнитель по проекту	Выполняет отдельные работы по проекту	378
ИТОГО:				426

5.3. Планирование управления научно-техническим проектом

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованными в рамках данного проекта.

Таблица 12

Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	119722
3.1.1. Источник финансирования	НИИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	11.03.2019-08.06.2019
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	22.01.2019
3.2.2. Дата завершения проекта	08.06.2019
3.3. Прочие ограничения и допущения*	Ограничение по времени до защиты магистерской диссертации

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

5.3.1. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы (табл. 13).

Таблица 13

Календарный план проекта

Название	Длительность, раб.	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
Составление технического задания	6	11.03.19	16.03.19	Руководитель
Подбор и изучение материалов по теме	12	18.03.19	30.03.19	Магистрант
Выбор направления исследований	2	18.03.19	19.03.19	Руководитель
Разработка общей методики проведения исследований	6	20.03.19	26.03.19	Руководитель
Календарное планирование работ по теме	4	27.03.19	30.03.19	Руководитель
Изучение документации, поиск литературы	12	01.04.19	13.04.19	Магистрант
Поиск статей в журналах по выбранной тематике	6	15.04.19	20.04.19	Магистрант
Получение необходимых данных	10	22.04.19	04.05.19	Магистрант
Создание графических зависимостей	5	06.05.19	11.05.19	Магистрант
Анализ и описание результатов	12	13.05.19	25.05.19	Магистрант
Проверка полученных результатов	6	27.05.19	01.06.19	Руководитель
Составление пояснительной записки	6	03.06.19	08.06.19	Магистрант
Итого	87			

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 14 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Март		Апрель			Май			Июнь
				2	3	1	2	3	1	2	3	1
1	Составление технического задания	Р	7	■								
2	Подбор и изучение материалов по теме	С	14		▨							
3	Выбор направления исследований	Р	2		■							
4	Разработка общей методики проведения исследований	Р	7		■							
5	Календарное планирование работ по теме	Р	5			■						
6	Изучение документации, поиск литературы	С	14			▨						
7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	С	7				▨					
8	Получение необходимых данных	С	14				▨					
9	Создание графических зависимостей	С	7					▨				
10	Анализ и описание результатов	С	14						▨			
11	Проверка полученных результатов	Р	7							■		
12	Составление пояснительной записки	С	7								▨	

▨ - магистрант; ■ - руководитель.

5.3.2. 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.

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 15

Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1.	Wolfram Mathematica 11.1	1	10 300	10 300
	Итого			10 300

Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, но используемого для выполнения конкретной темы, сводятся в табл. 21.

Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая

ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (26)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (27)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 19);

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (28)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 16).

Таблица 16

Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный доклад работника с учетом районного коэффициента для Томска $k_p = 1.3$, вычисляется:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot 1.3. \quad (29)$$

Данные и результаты расчета основной заработной платы приведены в таблице 17, например, для руководителя расчет основной заработной платы, зная, что его оклад 47104 руб./месяц, проводится следующим образом:

- находим месячный должностной оклад:

$$Z_M = 47104 \cdot 1,3 = 61235 \text{ руб./месяц} \quad (30)$$

- рассчитываем среднедневную заработную плату:

$$Z_{дн} = \frac{61235 \cdot 10.4}{251} = 2537 \text{ руб./день} \quad (31)$$

- рассчитываем основную заработную плату:

$$Z_{осн} = 2537 \cdot 24 \cdot \frac{1}{3} = 20298 \text{ руб.} \quad (32)$$

Подобный расчет проводится для вычисления основной заработной платы инженера.

Таблица 17 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	k_p	Z_m , руб./месяц	$Z_{дн}$, руб./день	$T_{p,раб.}$ Дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	47104	1,3	61235	2537	8	20298
Инженер	12664	1,3	16437	681	63	42907
Итого $Z_{осн}$						63205

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

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

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

Дополнительная заработная плата для руководителя вычисляется следующим образом:

$$Z_{доп} = 20298 \cdot 0,1 = 2030 \text{ руб.} \quad (34)$$

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 18.

Таблица 18 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнитель	$k_{доп}$	$Z_{осн}$	$Z_{доп}$
Руководитель	0,1	20298	2030
Магистрант	0,1	42907	4291
Итого			6321

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (35)$$

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

$$k_{\text{внеб}} = 0,271.$$

Таким образом отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя вычисляются следующим образом:

$$З_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (39040 + 3904) = 11638 \text{ руб.} \quad (36)$$

Таблица 19 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	20298	42907
Дополнительная заработная плата, руб.	2030	4291
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	0,271
Сумма отчислений	6051	12791
Итого		18842

Накладные расходы

Накладные расходы составляют 30 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (37)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Таблица 20 – Накладные расходы

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	20298	42907
Дополнительная заработная плата, руб.	2030	4291
Коэффициент накладных расходов	0,3	0,3
Сумма накладных расходов	6698	14159
Итого		20857

Прочие прямые затраты

Сюда входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. Мощность ноутбука 90 Вт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot t = 5,8 \cdot 0,09 \cdot 378 = 197 \text{ руб} \quad (38)$$

где $C_{\text{эл}}$ — тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч); P — мощность оборудования, кВт; t — время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 197 рублей.

Расчет бюджета научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 21.

Таблица 21 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Затраты на специальное оборудование	10300
2. Затраты по основной заработной плате	63205
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	6321
4. Отчисления во внебюджетные фонды	18842
5. Накладные расходы	20857
6. Прочие прямые затраты	197
Бюджет затрат НИИ	119722

5.3.3 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу была сведена в таблицу 22.

Таблица 22

Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность	Влияние	Уровень риска*	Способы смягчения риска
1	Отсутствие экспериментальных данных	Сложности при сравнении расчетных и реальных характеристик пучка	1	3	Низкий	Поиск данных с других ускорителей
2	Поломка ноутбука	Затруднение проведения вычислений	3	4	Выше среднего	Предоставление студенту рабочего места с компьютером

5.4. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

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.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (39)$$

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

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (40)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы (табл. 23).

Исп.1 – Диагностика пучка с помощью Черенковского излучения с наклонной мишенью;

Исп.2 – Диагностика пучка с помощью Черенковского излучения без наклонной мишени;

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Соответствие теории и эксперимента	0,25	4	4
2. Удобство в эксплуатации	0,10	5	3
3. Сложность установки в существующие устройства	0,30	5	2
4. Стоимость внедрения	0,20	4	3
5. Время проведения измерений	0,15	4	4
ИТОГО	1	22	16

$$I_{p-исп1} = 4*0,25 + 5*0,1 + 5*0,30 + 4*0,20 + 4*0,15 = 4,4 \quad (41)$$

$$I_{p-исп2} = 4*0,25 + 3*0,1 + 2*0,30 + 3*0,20 + 4*0,15 = 3,1 \quad (42)$$

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т.д.} \quad (43)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.24) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (44)$$

Таблица 24 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.4	3.1
3	Интегральный показатель эффективности	4.4	3.1
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.42	0.7

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Заключение и выводы

В ходе выполнения магистерской диссертации были получены следующие результаты:

- Написана и проверена программа, позволяющая рассчитать угловое распределение ИВЧ от пластин любой толщины с заданным коэффициентом преломления с учетом угла многократного рассеяния;
- Получены полярные распределения интенсивности ИВЧ для энергии томского микротрона для мишени из кварца толщиной 1.5 мм;
 - Получена зависимость максимального угла отклонения ИВЧ от угла наклона мишени толщиной 1.5 мм;
 - Выяснено, что для толщины 1.5 мм при угле наклона мишени меньше 9 градусов ИВЧ будет отражаться внутрь пластины;
- Получены распределения интенсивности ИВЧ по полярному и азимутальному углам для энергии томского микротрона для мишени из кварца толщиной 0.3 мм при угле наклона мишени относительно пучка – 54° ;
 - при увеличении отклонения от 180° по азимутальному углу ширина пика увеличивается и максимум интенсивности сдвигается в сторону увеличения полярного угла
 - по азимутальному углу происходит разделение пиков интенсивности;
 - ширина пиков по азимутальному углу на порядок больше, чем по полярному.
- Получены трехмерные графики распределения интенсивности ИВЧ по полярному и азимутальному углам для энергии томского микротрона для мишени из кварца толщиной 0.3 мм при угле наклона мишени относительно пучка – 54° ;
 - при отклонении от 180° по азимутальному углу интенсивность в максимуме уменьшается;
 - распределение симметрично по азимутальному углу;

- максимум интенсивности резко падает от $2925 \frac{e^2}{\pi^2 c} 10^3$ до $142 \frac{e^2}{\pi^2 c} 10^3$ в промежутке от 110.3^0 до 110.2^0 по азимутальному углу и далее падает почти до 0;
- Получены трехмерные графики распределения интенсивности ИВЧ по направляющим косинусам n_x и n_y для энергии томского микротрона для мишени из кварца толщиной 0.3 мм при угле наклона мишени относительно пучка – 54^0 ;
- Получены трехмерные графики распределения интенсивности ИВЧ в системе отсчета связанной с пучком электронов;
- Получены распределения интенсивности ИВЧ по полярному углу для энергии томского микротрона для мишени из кварца толщиной 0.3 мм при угле наклона мишени относительно пучка – 54^0 с учетом угла многократного рассеяния в 2-х системах отсчета;
 - интенсивность излучения падает, пик при этом уширяется;
 - положение максимума интенсивности остается неизменным;
- Получено полярное распределение интенсивности ИВЧ и угол наклона мишени при угле расположения детектора 30^0 для энергии 1ГэВ для мишеней из кварца толщиной 1 мм и 4 мм в системе отсчета, связанной с пучком электронов с учетом угла многократного рассеяния и без него;
 - угол наклона мишени 19.78^0 ;
 - при увеличении толщины мишени угол многократного рассеяния увеличивается, за счет этого ширина пика увеличивается;
 - интенсивность в максимуме увеличивается;
 - положение максимума остается неизменным;
- Исследована зависимость ширины и высоты пика, а также границы по азимутальному углу при изменении угла наклона мишени для энергии томского микротрона для мишени из кварца толщиной 0.3 мм;
 - при приближении угла наклона мишени к черенковскому углу ширина пика по полярному и азимутальному углам увеличивается;

- максимум интенсивности возрастает при увеличении угла наклона мишени;
- полярный угол, соответствующий максимуму, уменьшается при приближении угла наклона мишени к черенковскому углу;
- при $-\psi < \theta_{ch}$ при увеличении угла наклона мишени спад интенсивности при увеличении азимутального угла становится более плавным. Границы по азимутальному углу расширяются;
- при $-\psi \geq \theta_{ch}$ при увеличении угла наклона мишени спад интенсивности при увеличении азимутального угла сначала очень резкий, потом становится более плавным. Границы по азимутальному углу сужаются.

Разработанный код позволяет выбрать толщину кварцевой мишени для экспериментов по диагностике расходимости электронного пучка исходя из энергии электронов пучка и из критерия примерного совпадения ожидаемой расходимости с характерным углом, описывающим угловое распределение излучения.

В последние годы наблюдается интерес к применению черенковского излучения для измерения характеристик пучка. В связи с этим был освоен подход, основанный на методе изображений и написана программа, позволяющая рассчитывать характеристики черенковского излучения от диэлектрических пластин любой толщины с заданным коэффициентом преломления.

Список литературы

1. П. А. Черенков ДАН 2, 451 (1934).
2. И. Е. Тамм, И. М. Франк ДАН СССР 14, 107 (1937).
3. Дж. Джелли, Черенковское излучение и его применение, Изд. Иностранной литературы, 1960.
4. В. П. Зрелов, Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий, Атомиздат, 1968.
5. A. V. Smirnov, In: Photonics Research Development, Ed. Viktor Nilsson, Nova Science Publishers, Inc., pp. 247-269 (2008).
6. V. Bleko, P. Karataev, A. Konkov, K. Kruchinin, G. Naumenko, A. Potylitsyn, and T. Vaughan, Journal of Physics: Conf. Series 732, 012006 (2016).
7. T. Takahashi, Y. Shibata K. Ishi, M. Ikezawa, M. Oyamada, Y. Kondo, Phys. Rev. E 62(6), 8606 (2000).
8. Г. А. Наumenко, А. П. Потылицын, М. В. Шевелёв, Ю. А. Попов, Письма в ЖЭТФ 94(4), с. 280 (2011).
9. D. V. Karlovets and A. P. Potylitsyn, arXiv:0908.2336v2. URL: <http://arxiv.org/abs/0908.2336>.
10. Д. В. Карловец, ЖЭТФ 140(7), 36 (2011).
11. М. В. Шевелёв, А. С. Коньков, ЖЭТФ 145(4), 579 (2014).
12. Y. Takabayashi, E. I. Fiks, Yu. L. Pivovarov, Physics Letters A 379, 1032 (2015).
13. <http://www.refractiveindex.info>.
14. А. С. Коньков, А. П. Потылицын, М. В. Шевелёв, А. С. Арышев, Письма в ЖЭТФ 105(4), 212 (2017).
15. R. Kieffer, L. Bartnik, M. Bergamaschi, V. V. Bleko, M. Billing, L. Bobb, J. Conway, M. Forster, P. Karataev, A. S. Konkov, R. O. Jones, T. Lefevre, J. S. Markova, S. Mazzoni, Y. Padilla Fuentes, A. P. Potylitsyn, J. Shanks, and S. Wang, Phys. Rev. Lett. 121, 054802 (2018).
16. В. Е. Пафомова, труды ФИАН XLIV, 28 (1969)

17. А. П. Потылицын, С.Ю. Гоголев, Письма в ЖЭТФ 16(2), с. 147 (2018).
18. В. И. Беспалов, Лекции по радиационной защите, Издательство Томского политехнического университета, 2017.
19. V. G. Moliere, Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen II Mehrfach und Vielfachstreuung, Naturforschg, 1947.
20. ГОСТ 12.0.002-2014. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
21. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 2017 г.
22. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78)
23. ГОСТ 12.1.030-82, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
24. НПБ 105-03. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 1 авг. 2003 г.
25. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.
26. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно- эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» (с изменениями на 21.06.2016).
27. Правила противопожарного режима в Российской Федерации.

Приложение I

(справочное)

Cherenkov radiation

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Атовуллаев Тимур		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподава- тель	Шайкина О.И.			

Introduction

This work is devoted to the study of Cherenkov radiation that occurs when an electron beam passes through an inclined dielectric plate. Cherenkov radiation occurs when a charged particle passes through a medium, at a speed greater than the speed of light in a given medium.

Cherenkov radiation has found wide application in the creation of elementary particle detectors. However, in recent years, some authors have found the use of Cherenkov radiation to diagnose short bunches that generate this radiation when passing through a dielectric plate. To diagnose beams, it is necessary to know the spectral angular characteristics of the radiation. Unfortunately, today analytical methods allow obtaining such characteristics only for the simplest geometries of targets. The most common are the method of polarization currents and the method of images Papomov.

Thus, in recent years, interest has been observed in the use of Cherenkov radiation for measuring the characteristics of a beam. In this regard, an approach based on the method of images was mastered and a program that allows you to calculate the characteristics of Cherenkov radiation from dielectric plates of any thickness with a given refractive index was written.

Literature Review

The radiation of a charge moving at a speed exceeding the speed of light in a medium (Vavilov-Cherenkov radiation, VChR), discovered more than 80 years ago [1, 2], is widely used in the detection of elementary particles [3, 4]. In recent years, it has been proposed to use a coherent VChR mechanism for developing and creating radiation sources in the THz and sub-THz ranges [5, 6]. Schemes of such sources assume the use of the working volume of the dielectric, for example, in the form of a prism [7, 8] for outputting radiation to vacuum. To date, there are no analytical methods for calculating the characteristics of VChR, which is generated in radiators of arbitrary shape. In the series of works [9, 10], an approach (the so-called polarization current method) which allows to calculate the spectral-angular distribution of the VChR in final targets of arbitrary shape, for example, in a plate and prism [11] was proposed.

In the experiment [12], the characteristics of an optical VChR when it was generated by an electron beam with an energy of 255 MeV in an inclined diamond plate with a thickness of $L = 50 \mu\text{m}$ were investigated. For the wavelength $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, the diamond refractive index is $n \approx 2.43$ [13]. To remove the optical VChR avoiding the effect of total internal reflection on the output face, in the cited paper we investigated radiation emitted at an angle of 90.5° relative to the electron momentum from a plate tilted at an angle $\psi = 50.3^\circ$ (see Fig. 1a).

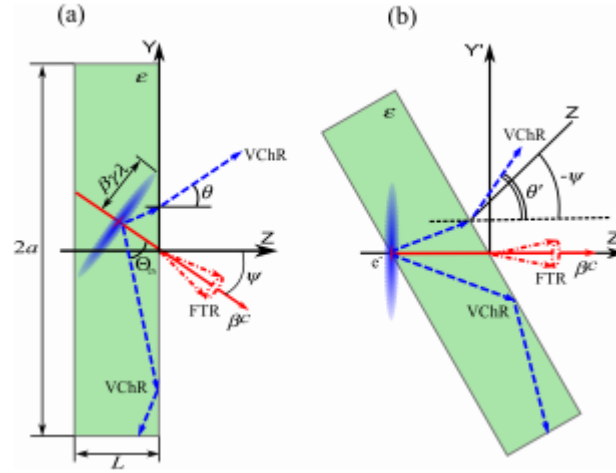


Figure 1. Angular variables used to describe the Vavilov-Cherenkov radiation and the forward transition radiation. The product $\beta\gamma\lambda$ denotes the effective radius of the electron Coulomb field.

Obviously, only a part of the VChR emitted along the generators of the cone with the vertex angle is $\Theta_{ch} = \arccos(1 / (\beta\sqrt{\epsilon}))$ (ϵ is the dielectric constant of the medium, $\beta = v / c$, v is the velocity of motion of a charged particle, c - the speed of light) can escape from the dielectric to a vacuum, while part of the radiation does not escape from the target due to total internal reflection (see Fig. 1a). As a result, the azimuthal symmetry of the distribution of VChR in the vacuum will be broken. Another violation of the azimuthal symmetry of radiation was considered in [14], where the characteristics of the VChR arising from the passage of a charge in vacuum near a dielectric target (the so-called “cherenkov diffraction radiation” [15]) were studied. In this work, we explore the traditional mechanism of VChR.

In the works of V.E. Pafomov [16] expressions were obtained. They describe the spectral-angular distribution of the VChR at the exit of the inclined plate, which is unlimited in the transverse direction. These expressions also allow to analyze the asymmetric azimuthal distribution of the VChR, however, to date, such analysis has not been carried out.

It should be noted that in experiment [12], the dependence of the output of the VChR on the angle of rotation of the target, measured from the direction of the electron beam for a fixed azimuth angle $\varphi = 0^0$ (i.e., in the plane of Fig. 1a), was investigated.

It is undoubtedly interesting to find out the dependence of the spectral-angular characteristics of the VChR on the degree of axial symmetry breaking in the considered geometry.

In the coordinate system, where the z axis is directed along the perpendicular to the exit surface of the plate (see Fig. 1a), the formulas for the intensities of the components of the VChR polarized in parallel (passing through the z axis and the velocity vector of the charged particle) and perpendicular to the planes are given by the expressions (18.25), (18.26) in article [16]. These expressions make it possible to calculate the spectral-angular distribution of the VChR in an infinite plate, taking into account the effect of multiple reflections of radiation inside the plate:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W_{\parallel}}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2}{\pi^2 c} \frac{\beta_z^2 n_z^2 |\varepsilon - 1|^2}{\sin^2(\theta) \left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 n_z^2 \right|^2} \times \\ &\times \frac{\left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 Z^2 \right|^{-2}}{\left| e^{-\frac{i\omega LZ}{c}} (Z + \varepsilon \cos(\theta))^2 - e^{\frac{i\omega LZ}{c}} (Z - \varepsilon \cos(\theta))^2 \right|^2} \times \\ &\times \left| e^{-\frac{i\omega LZ}{c}} (1 - n_y \beta_y + \beta_z Z)(Z + \varepsilon \cos(\theta)) \times (\sin^2(\theta)(1 - \beta_z^2 - n_y \beta_y - \beta_z Z) + \right. \\ &n_y \beta_y \beta_z Z) + e^{\frac{i\omega LZ}{c}} (1 - n_y \beta_y - \beta_z Z)(Z - \varepsilon \cos(\theta)) \times (\sin^2(\theta)(1 - \beta_z^2 - n_y \beta_y + \\ &\beta_z Z) - n_y \beta_y \beta_z Z) - 2Z e^{-\frac{i\omega L(1 - n_y \beta_y)}{\beta_z c}} \left[\beta_z (n_y \beta_y - \sin^2(\theta)) \times (\beta_z \varepsilon - \beta_z \sin^2(\theta) + \right. \\ &\left. \left. \varepsilon n_z - n_y \beta_y \beta_z Z) + \sin^2(\theta)(1 - \beta_z^2 - n_y \beta_y)(1 - n_y \beta_y + n_z \beta_z \varepsilon) \right] \right|^2 \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W_{\perp}}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2}{\pi^2 c} \frac{\beta_z^2 n_z^2 \beta_y^2 n_x^2 |\varepsilon - 1|^2}{\sin^2(\theta) \left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 n_z^2 \right|^2} \times \\ &\times \frac{\left| (1 - n_y \beta_y)^2 - \beta_z^2 Z^2 \right|^{-2}}{\left| e^{-\frac{i\omega LZ}{c}} (Z + \varepsilon \cos(\theta))^2 - e^{\frac{i\omega LZ}{c}} (Z - \varepsilon \cos(\theta))^2 \right|^2} \times \end{aligned}$$

$$\times |e^{-\frac{i\omega LZ}{c}}(1 - n_y\beta_y + \beta_z Z)(Z + \varepsilon \cos(\theta)) + e^{\frac{i\omega LZ}{c}}(1 - n_y\beta_y - \beta_z Z)(Z - \varepsilon \cos(\theta)) - 2Ze^{-\frac{i\omega L(1-n_y\beta_y)}{\beta_z c}}(1 - n_y\beta_y + n_z\beta_z\varepsilon)|^2 \quad (2)$$

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2W_{\perp}}{d\omega d\Omega} + \frac{d^2W_{\parallel}}{d\omega d\Omega} \quad (3)$$

Here, we use the notations $Z = \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}$, $\beta_y = -\beta \sin(\psi)$, $\beta_z = \beta \cos(\psi)$, $n_x = \sin(\theta) \sin(\varphi)$, $n_y = \sin(\theta) \cos(\varphi)$, $n_z = \cos(\theta)$. θ , φ are the polar and azimuth angles characterizing the wave vector in vacuum (see Fig. 1a), L is the plate thickness.

Expressions (1) and (2) describe the polarization components of the spectral energy density of not only Vavilov-Cherenkov radiation, but also forward transition radiation, which extends into the half-space $z > 0$.

According to [17], the coordinate system presented in Fig. 1b, where the z' axis is directed along the electron pulse, is simpler to analyze. Variables in both systems are connected by a standard angle matrix of rotation ψ , which makes it possible to convert expressions (1, 2) to more convenient angular variables θ' , φ' (θ' is the angle between the wave vector and the electron momentum of the electron, φ' is the azimuth angle see fig.1b). The relationship between the direction cosines in the hatched coordinate system is $N_x = \sin(\theta') \sin(\varphi')$, $N_y = \sin(\theta') \cos(\varphi')$, $N_z = \cos(\theta')$, and in the original coordinate system is given Forms $N_x = n_x$, $N_y = n_y \cos(\psi) + n_z \sin(\psi)$, $N_z = n_z \cos(\psi) - n_y \sin(\psi)$, from which the necessary formulas are derived:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta') \cos(\psi) + \sin(\theta') \cos(\varphi') \sin(\psi) \quad (4)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{\sin(\theta') \sin(\varphi')}{\sin(\theta') \cos(\varphi') \cos(\psi) - \cos(\theta') \sin(\psi)} \quad (5)$$

As noted above, expressions (1, 2) are valid only for a plate that is not limited in the transverse direction. To take into account the dimensions of the plate, it is necessary to use the method of polarization currents.

The final expression obtained in [17] for the spectral-angular density in vacuum of polarization radiation emitted from the front "output" face (the face is perpendicular to the z-axis (see Fig.1a)) of the target after all mathematical transformations has a simpler form by comparison with the formula V.E. Pafomov (3):

$$\begin{aligned} \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = & \frac{e^2}{\pi^2 c} \frac{\beta_z^2 \cos^2(\theta)}{((1-n_y\beta_y)^2 - \beta_z^2 \cos^2(\theta))^2} \left| \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} \right|^2 \times (\beta_y^2 \beta_z^2 \sin^2(\theta) (|Z|^2 + \\ & + \sin^2(\theta)) \left| \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\cos(\theta)+Z} \right|^2 + \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon \cos(\theta)+Z} \right|^2 |(\beta_z^2 + n_y\beta_y + \beta_z Z - 1) \sin(\theta) - \\ & - \beta_z \beta_y \cos(\phi) Z|^2) \left| \frac{1-e^{-\frac{i\omega L(1-n_y\beta_y-\beta_z Z)}{\beta_z c}}}{1-n_y\beta_y-\beta_z Z} \right|^2 \quad (6) \end{aligned}$$

The results of calculations by the method of polarization currents and the Pafomov formula for a diamond target with a thickness of 50 μm used in the experiment [12] oriented at an angle of $\psi = 50.3^\circ$ are also compared.

Thus, in paper [17] it was shown that the results obtained by the method of polarization currents and the Pafomov method of images give identical dependences and are in good agreement with experimental data [12]. Consequently, both methods are suitable for modeling the spectral angular distribution of Cherenkov radiation for a plate in the form of a parallelepiped.

Bibliography

1. P. A. Cherenkov Reports of the Academy of Sciences 2, 451 (1934).
2. I. E. Tamm, I. M. Frank Reports of the Academy of Sciences USSR 14, 107 (1937).
3. J. Jelly, Cherenkov radiation and its application, Ed. Foreign literature, 1960.
4. V. P. Zrelov, Vavilov – Cherenkov radiation and its application in high-energy physics, Atomizdat, 1968.
5. A. V. Smirnov, In: Photonics Research Development, Ed. Viktor Nilsson, Nova Science Publishers, Inc., pp. 247-269 (2008).
6. V. Bleko, P. Karataev, A. Konkov, K. Kruchinin, G. Naumenko, A. Potylitsyn, and T. Vaughan, Journal of Physics: Conf. Series 732, 012006 (2016).
7. T. Takahashi, Y. Shibata K. Ishi, M. Ikezawa, M. Oyamada, Y. Kondo, Phys. Rev. E 62(6), 8606 (2000).
8. G. A. Naumenko, A. P. Potylitsyn, M. V. Shevelov, Y. A. Popov, Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics 94(4), c. 280 (2011).
9. D. V. Karlovets and A. P. Potylitsyn, arXiv:0908.2336v2. URL: <http://arxiv.org/abs/0908.2336>.
10. D. V. Karlovets, Journal of Experimental and Theoretical Physics 140(7), 36 (2011).
11. M. V. Shevelov, A. S. Konkov, Journal of Experimental and Theoretical Physics 145(4), 579 (2014).
12. Y. Takabayashi, E. I. Fiks, Yu. L. Pivovarov, Physics Letters A 379, 1032 (2015).
13. <http://www.refractiveindex.info>.
14. A. S. Konkov, A. P. Potylitsyn, M. V. Shevelov, A. S. Arishev, Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics 105(4), 212 (2017).

15. R. Kieffer, L. Bartnik, M. Bergamaschi, V. V. Bleko, M. Billing, L. Bobb, J. Conway, M. Forster, P. Karataev, A. S. Konkov, R. O. Jones, T. Lefevre, J. S. Markova, S. Mazzoni, Y. Padilla Fuentes, A. P. Potylitsyn, J. Shanks, and S. Wang, *Phys. Rev. Lett.* 121, 054802 (2018).
16. V. E. Pafomova, *LPI works XLIV*, 28 (1969)
17. A. P. Potylitsyn, S.Y. Gogolev, *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics* 16(2), c. 147 (2018).