

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

Институт Физико-технический институт (ФТИ)
Специальность Физика атомного ядра и частицы
Кафедра Прикладная физика (ПФ)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ УМЕРЕННО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ В ПОВОРОТНЫХ МАГНИТАХ

УДК 537.531.2:004.94

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Харисова Анастасия Евгеньевна		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Тухватулина Лилия Равильевна	к. ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к. ф.-м. н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ ФТИ ТПУ	Вагнер Александр Рудольфович	к. ф.-м. н.		

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

Институт Физико-технический институт
 Направление Ядерные физика и технологии
 Кафедра Прикладная физика

УТВЕРЖДАЮ
 Зав. кафедрой ПФ ФТИ

_____ А.Р. Вагнер
 (Дата) (Подпись)

ЗАДАНИЕ
на выполнение бакалаврской работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Б	Харисовой Анастасии Евгеньевне

Тема работы:

Исследования характеристик излучения электронов умеренно релятивистских энергий в поворотных магнитах

Утверждена приказом директора ФТИ	от 16.02.2016 №1237/С
--	-----------------------

Дата сдачи студентом выполненной работы	15.06.16
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Прикладное программное обеспечение для расчета характеристик СИ SPECTRA, пакет символьных вычислений Wolfram Mathematica, многоядерный кафедральный сервер.
---------------------------------	---

Перечень подлежащих к исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор литературных источников по исследуемой тематике; проведение моделирования; анализ полученных результатов; экономическая часть бакалаврской работы (Расчет себестоимости НИОКР); социальная ответственность.
---	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент, к. фил. наук Тухватулина Л.Р.
Социальная ответственность	Ассистент каф. ПФ, к. ф.-м. н. Гоголева Т.С.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.03.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Шкигов Д.А.	к. ф.-м. н.		01.03.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Харисова А. Е.		01.03.2016

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

Институт Физико-технический институт
 Направление Ядерная физика и технологии
 Кафедра Прикладная физика
 Период выполнения весенний семестр 2016 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.16
--	----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
8.03.15	Составление и утверждение технического задания	5
4.04.15	Подбор и изучение материалов по теме	10
1.05.15	Выбор направления исследования	5
30.05.15	Проведение численного моделирования	40
9.06.15	Анализ и описание результатов	30
15.06.15	Подготовка к защите ВКР	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Шкигов Д.А.	К.ф.-м. н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Учeная степень, звание	Подпись	Дата
ПФ	Вагнер А.Р.	к.ф. - м.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Б	Харисовой Анастасии Евгеньевне

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

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>1. Потенциальные потребители результатов исследования 2. Анализ конкурентных технических решений</i>
<i>2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований</i>	
<i>3. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>1. Структура работ в рамках научного исследования 2. Определение трудоемкости выполнения работ 3. Разработка графика проведения научного исследования 4. Бюджет научно – технического исследования (НТИ) 4.1. Расчет материальных затрат НТИ 4.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ</i>

	<p>4.3. Основная заработная плата исполнителей темы</p> <p>4.4. Отчисления на социальные нужды</p> <p>4.5. Накладные расходы</p> <p>4.6. Формирование бюджета затрат научно – исследовательского проекта</p>
2. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта
Перечень графического материала:	
<p>1. Календарный график проведения исследования в виде диаграммы Ганта</p> <p>2. Бюджет проекта</p>	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.16

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тухватулина Л.Р.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Харисова А. Е.		

**ЗДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Б	Харисовой Анастасии Евгеньевне

Институт	ФТИ	Кафедра	ПФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.80.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>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 (коллективные и индивидуальные).
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	04.05.16
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Харисова А. Е.		

Оглавление	
АННОТАЦИЯ	11
ВВЕДЕНИЕ	13
1 Теория синхротронного излучения.....	15
1.1 Теоретические основы синхротронного излучения.....	15
1.2 Дипольные магниты и источники синхротронного излучения.....	25
2 Численное моделирование характеристик излучения электронов от короткого магнита на микротроне.....	31
2.1 Описание эксперимента по исследованию излучения в коротком магните	31
2.2 Применение SPECTRA для численного моделирования синхротронного излучения.....	33
2.3 Результаты моделирования характеристик излучения от короткого магнита	39
Заключение.....	51
Выводы.....	51
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	53
3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	54
3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	54
3.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	55
3.1.3 SWOT-анализ	57
3.2 Планирование научно-исследовательских работ	60
3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	60
3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	62
3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	64

3.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	65
3.2.5 Расчет материальных затрат НТИ.....	65
3.2.6 Основная заработная плата исполнителей темы	67
3.2.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	69
3.2.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	70
3.2.9 Затраты на научные и производственные командировки.....	71
3.2.10 Контрагентные расходы	71
3.2.11 Накладные расходы.....	72
3.2.12 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта ..	73
3.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	74
4 Социальная ответственность	76
4.1 Анализ опасных и вредных факторов.....	76
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	78
4.2.1. Организационные мероприятия.....	78
4.2.2. Технические мероприятия	79
4.2.3. Условия безопасной работы.....	81
4.3 Электробезопасность	83
4.4 Противопожарная безопасность	85
Список литературы.....	87
Приложение А	90
Приложение Б.....	97

АННОТАЦИЯ

В настоящее время синхротронное излучение имеет широкое применение в науке и медицине. В мире строятся новые установки по генерации синхротронного излучения от различных магнитных устройств. Поэтому исследования в этой области могут быть полезными для приложений по генерации синхротронного излучения.

Синхротронное излучение (СИ) заряженных частиц с круговой орбиты исследовано подробно как теоретически, так и экспериментально. Однако, спектрально–угловые характеристики СИ от коротких магнитов, с длиной магнитного поля вдоль траектории электронов сравнимой или меньше длины формирования излучения $\gamma^2\lambda$, где γ - Лоренц-фактор, а λ - длина волны исследуемого излучения, могут существенно отличаться от характеристик традиционного СИ.

При исследовании СИ релятивистских электронов в однородном магнитном поле основное внимание уделяется спектрально–угловым характеристикам излучения. В работе представлены результаты численного моделирования характеристик СИ электронов умеренно релятивистских энергий в поворотном магните. Выполнен, сравнительный анализ углового распределения когерентного СИ, полученного при моделировании, с данными эксперимента по генерации когерентного СИ от короткого поворотного магнита, ранее полученными на микротроне ТПУ. Из анализа можно сделать вывод, что результаты моделирования качественно хорошо согласуются с экспериментом.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 100 с., 37 рис., 14 табл., 25 источников, 2 прил.

Ключевые слова: синхротронное излучение, поворотный магнит, когерентность, SPECTRA, моделирование.

Объектом исследования является: когерентное синхротронное излучение в поворотном магните.

Цель работы – исследование характеристик синхротронного излучения от электронного пучка с энергией 6.1 МэВ в коротком поворотном магните.

В процессе исследования проводилось компьютерное моделирование с помощью программного обеспечения SPECTRA и анализ полученных результатов.

В результате исследования было сделано заключение о возможности использования программы SPECTRA для моделирования СИ в поворотных магнитах с учётом реальных параметров электронного пучка ускорителя и магнитного поля.

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

Область применения: в качестве источника электромагнитного излучения, и как средство для диагностики пучков заряженных частиц.

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

В будущем планируется: разобраться в способах описания пучков заряженных частиц; провести анализ влияния характеристик магнитного поля на синхротронное излучение; разработка математической модели, описывающей синхротронное излучение от электронного сгустка произвольной формы.

ВВЕДЕНИЕ

Все более широкое научное и техническое использование находит синхротронное излучение, сопровождающее движение электронов в поворотных магнитах синхротронов и накопительных кольцах. В настоящее время СИ используется в основном как источник электромагнитного излучения и имеет широкое применение [1]. Однако СИ применяется и как средство для диагностики пучков заряженных частиц [2].

СИ можно использовать в качестве источника когерентного излучения в сантиметровом диапазоне, но т.к. основная мощность излучения сосредоточена в более жёстких областях спектра — вакуумной ультрафиолетовой и рентгеновской — в них и развиваются основные применения синхротронного излучения.

Применения СИ можно отметить следующие:

- Структурный и химический анализ для создания новых материалов;
- Медицинская диагностика и терапия.

Синхротронное излучение в рентгеновской области позволяет проводить рентгеноструктурные и рентгеноспектральные измерения, благодаря которым можно не только исследовать структуру молекул, но и наблюдать динамику процессов образования и изменения конформации молекул и кластеров, и даже процессы разрыва и образования химических связей. Высокая интенсивность синхротронного излучения позволяет уменьшить размеры исследуемых объемов вещества до субмикронных размеров (менее 100 нм), благодаря чему возможно изучать свойства веществ с неомогенным составом и наноструктур.

Большое достоинство СИ заключается в том, что оно имеет малую угловую расходимость. Поэтому, кроме обычного метода поглощения, для получения изображений можно использовать рефракцию (преломление) или рассеяние фотонов на границах раздела сред. При этом оказывается, что рефракция более чувствительна к изменению плотности среды, чем

поглощение. Благодаря этим уникальным параметрам использование СИ весьма эффективно в различных диагностических процедурах, например в ангиографии, маммографии, денситометрии, — то есть там, где требуется высокое качество снимков. В результате становится возможной диагностика онкологических заболеваний на ранней стадии их развития [3].

Однако при всех своих положительных качествах СИ не может полностью удовлетворить все возрастающие требования, предъявляемые к характеристикам излучения: интенсивности, спектральному диапазону, монохроматичности, возможности оперативной перестройки вида поляризации. Излучение, в значительной степени удовлетворяющее всем этим требованиям, может быть получено путем пропускания релятивистских заряженных частиц через ондулятор. В ондуляторе испускается электромагнитное излучение, порождаемое колебательным движением быстрых заряженных частиц. Движение такого типа реализуется, например, в пространственно-периодическом статическом магнитном поле (магнитный ондулятор) в кристаллах (природный ондулятор), в поле электромагнитной волны и в ряде других структур.

Большой прогресс в области создания новых источников на основе СИ требует проведения обширного моделирования характеристик СИ от различных магнитных устройств для различных параметров пучка ускорителя. Заметим, что точные аналитические решения для синхротронного излучения существуют только для одночастичного приближения и узкого класса задач. Уже для расчётов излучения от поворотных или подстроечных магнитов необходимо использовать численные методы решения, не говоря о такой разновидности СИ как ондуляторное излучение. Данное обстоятельство вызвало появление различных программ по моделированию свойств СИ [4].

1 Теория синхротронного излучения

Синхротронное излучение – электромагнитное излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися в магнитном поле. СИ обладает рядом уникальных свойств, определяющих его большое практическое значение: непрерывный спектр излучения от инфракрасного до рентгеновского; малая угловая расходимость испускаемого излучения; линейная поляризация с электрическим вектором, параллельным плоскости орбиты; круговая поляризация выше и ниже плоскости орбиты.

1.1 Теоретические основы синхротронного излучения

Как известно из основ классической электродинамики Максвелла, пространственное распределение мощности излучения нерелятивистского электрона описывается тороидом (рис. 1).

Это обычное дипольное излучение, и характер его распределения в пространстве был очень давно хорошо изучен Д. Лармором. Максимум излучения в этом случае достигается в направлении внешнего магнитного поля, когда угол Ψ' , если его отсчитывать от направления скорости частицы, приближается к значению $\pi/2$.

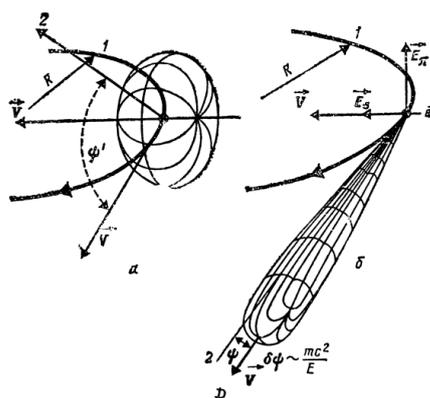


Рисунок 1 – Угловое распределение излучения электронов, движущихся по круговым орбитам: а — при низкой энергии ($v \ll c$); б — для ультрарелятивистских электронов ($v \sim c$); 1 — орбита; 2 — направление излучения; D — точка наблюдения [5].

Если электрон движется с релятивистской скоростью $v \sim c$ (т. е. $\beta = v/c \rightarrow 1$ и $E \gg mc^2$), то тороид, характеризующий пространственное распределение мощности излучения, сильно деформируется: тороид вытягивается в конус в направлении вектора скорости частицы (см. рис. 1, б). Физически это связано с эффектом Доплера. Если ввести релятивистский закон преобразования углов в предположении, что угол между вектором скорости частицы в системе координат, где излучатель покоится, и угол Ψ , под которым синхротронное излучение наблюдается в лабораторной системе, можно найти по известной формуле аберрации (преобразование Лоренца):

$$\sin \Psi = \sqrt{1-\beta^2} \sin \Psi' / (1 + \beta \cos \Psi'). \quad (1)$$

Полагая здесь для максимума нерелятивистского излучения $\Psi' \sim \pi/2$, получим, что в лабораторной системе координат наблюдатель увидит излучение в виде конуса с очень малым углом раскрытия

$$\sin \Psi \sim \delta \Psi = \sqrt{1-\beta^2} = mc^2 / E. \quad (2)$$

Таким образом, синхротронное излучение обладает ярко выраженным «прожекторным эффектом» [5]: оно направлено вперед по движению электрона и сосредоточено в очень узком конусе с углом раствора $\sim \delta \Psi$. Наблюдатель регистрирует это излучение как короткую вспышку, возникающую при прохождении иглообразного луча через точку наблюдения. Яркое пятно излучения, исходящего из камеры реального ускорителя, имеет размер, примерно равный поперечному сечению пучка электронов.

Одно из замечательных свойств синхротронного излучения — необычное спектральное распределение его мощности. Интуитивно, кажется, что если электрон движется по окружности радиуса R , то он должен излучать на частоте $\omega_0 = c/R$, однако спектр излучения релятивистского электрона не ограничен лишь основной частотой, равной частоте обращения электрона $\omega_0 = c/R$, а, напротив, основной вклад в мощность синхротронного излучения

вносят высшие гармоники ω_0 : $\omega_{изл} = v\omega_0$. Впервые на это обратили внимание Л. Арцимович и И. Померанчук, номер гармоники, соответствующей максимуму излучения, пропорционален третьей степени энергии $v_{max} = (E/mc^2)^3$. Таким образом, традиционный метод электродинамики — разложение мощности излучения в ряд по мультиполям — теряет смысл, и спектральный состав синхротронного излучения требует принципиально иного подхода.

Вследствие характерного «прожекторного эффекта» наблюдатель регистрирует СИ в виде коротких импульсов — вспышек, возникающих при прохождении иглообразного луча через точку наблюдения. Таким образом, наблюдатель «видит» электрон не на всей его траектории, а только лишь на ее коротком участке l . Если длина дуги формирования излучения $l = R\delta\Psi$, то время, в течение которого электрон пройдет по этой дуге, равно времени длительности всплеска излучения: $\tau' = l/c$. Поскольку электромагнитные волны распространяются с запаздыванием, длительность импульса (временной интервал) в лабораторной системе координат в соответствии с общими законами преобразования релятивистской теории уменьшается и будет равна $\Delta t = \tau'(1 - \beta^2) = \tau'/(E/mc^2)^2$. Таким образом, в точку наблюдения придет не одна волна, а целый цуг волн — волновой пакет, ибо одна-единственная волна не может переносить сигнал, локализованный во времени. Интервалы Δt и $\Delta\omega$, характеризующие длительность передаваемого сигнала и частотный состав спектра, связаны зависимостью $\Delta t \cdot \Delta\omega = 1$. Поэтому наблюдатель зарегистрирует целый ряд гармоник спектра, включая частоты порядка критической, равной

$$\Delta\omega = 1/\Delta t = (c/l)(E/mc^2)^2. \quad (3)$$

Но поскольку длина дуги формирования СИ равна $l = R\delta\Psi = Rmc^2/E$, для критической частоты мы получим $\omega_{кр} = v_{max}\omega_0$, $v_{max} \sim (E/mc^2)^3$.

Высшие гармоники кратны основной частоте ω_0 , и спектр излучения содержит дискретный ряд частот, начиная от основной ω_0 , и простирается в сторону высших гармоник.

Замечательным свойством синхротронного излучения является поляризация — это столь характерный признак, что он может даже служить критерием в экспериментальной проверке природы наблюдаемого излучения.

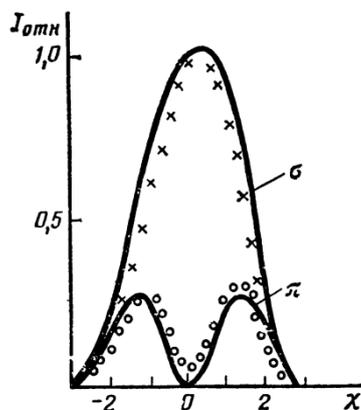


Рисунок 2 – Сравнение теоретических данных (сплошная кривая) с экспериментальными (точки) по угловому распределению σ - и π - компонент линейной поляризации синхротронного излучения при энергии электронов 250 МэВ в видимой области спектра [5].

Для СИ характерна сильно выраженная линейная поляризация, которую можно наблюдать в плоскости орбиты вращения электрона. При этом $7/8$ всей мощности излучения принадлежит σ -компоненте $W_\sigma=7/8W$, характерной тем, что электрический вектор поля излучения лежит в плоскости орбиты вращения и направлен перпендикулярно внешнему магнитному полю (рис. 2). Вторая компонента излучения — π -компонента — составляет только $1/8$ часть полной мощности излучения: $W_\pi=1/8W$, вектор электрического поля излучения при этом направлен практически вдоль внешнего магнитного поля [3].

Если наблюдать излучение строго в плоскости орбиты вращения электрона ($\chi=0$ на рис. 2), оно оказывается полностью линейно поляризованным — излучается только σ -компонента. Над плоскостью орбиты вращения можно наблюдать правую, а ниже плоскости — левую эллиптическую поляризацию.

Основные свойства СИ — спектрально-угловое распределение мощности и поляризации — нашли полное описание в классической теории, основанной на электродинамике Максвелла — Лоренца. В этом проявляется

еще одна замечательная особенность синхротронного излучения — все его характеристики оказались теоретически предсказуемыми и допускающими точное количественное описание.

Выражение для спектрально-углового распределения мощности синхротронного излучения с учетом также и его поляризационных свойств, дает возможность анализа поляризационных компонент.

Анализ углового распределения мощности СИ приводит к количественному подтверждению его особенностей — «прожекторный эффект» находит аналитическое описание. При этом угловое распределение компонент линейной поляризации обладает характерными особенностями, о которых мы уже говорили, исходя из качественных соображений. Эти особенности отражены на рис. 2. На этом рисунке по вертикали отложена мощность излучения в безразмерных единицах, а по горизонтали величина χ , пропорциональная углу Ψ , отсчитываемому от плоскости орбиты.

В плоскости орбиты ($\Psi = 0$) излучение σ -компоненты максимально, а W_{π} обращается в нуль. Прожекторный эффект находит полное подтверждение: при $\Psi \gg mc^2/E$ мощность излучения резко падает [5].

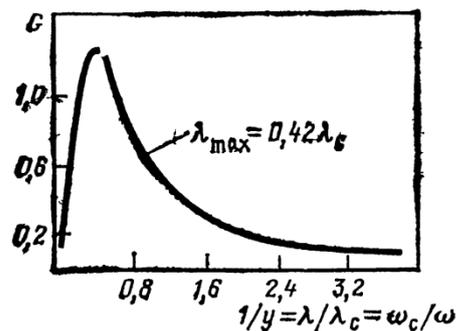


Рисунок 3 – Спектральное распределение мощности СИ (универсальная функция) [5].

Спектр СИ является дискретным, однако он содержит столь большое число отдельных спектральных линий, чрезвычайно близко прилежащих друг к другу, что в ультррелятивистском случае движения электрона СИ обладает

практически непрерывным спектром, максимум которого лежит в области высших гармоник частоты электрона. Это можно наглядно себе представить (рис. 3), если перейти от суммирования по номеру гармоники ν к интегралу по переменной:

$$y = \omega / \omega_c = \frac{2}{3} \nu \left(\frac{mc^2}{E} \right)^3. \quad (4)$$

Резкий максимум синхротронного излучения достигается вблизи критической частоты $\omega_c \sim (c/R)(E/mc^2)^3$. Варьируя энергию электрона, можно перекрыть всю шкалу электромагнитных волн.

Электромагнитное излучение из синхротронного кольца за пределы биологической защиты выводится по специальным вакуумным трубам, образующим каналы пучков СИ. Вакуум в каналах предотвращает рассеяние очень мощного потока излучения на молекулах атмосферных газов и не дает нагревать окружающие предметы. Труба канала обычно имеет длину порядка 10 м и выводит синхротронное излучение от точки его генерации через стену защиты, препятствующую распространению мощного ионизирующего излучения в зоны, где работают люди. Такая большая длина канала вывода излучения связана с тем, что защитная стена следует за траекторией кольца синхротрона, а излучение отбирается практически по касательной к этому кольцу, поэтому канал вывода пересекает стену под малым углом и линия пересечения оказывается длинной даже при небольшой толщине стены [5].

Через трубу канала видна некоторая часть орбиты электронов в пределах поворотного магнита, как это показано на рис. 4. Вектор \mathbf{B} на этом рисунке обозначает вектор индукции магнитного поля искривляющего траекторию движения электрона. В каждой точке этой криволинейной траектории по касательной электроны испускают электромагнитное излучение. Лучи, испускаемые каждым отдельным электроном сгустка на дуге орбиты $\Delta\theta$ вследствие релятивистских законов сосредоточены в узком конусе с углом

раствора $\sim 1/\gamma$ (рис. 4, а). Излучение от всех электронов сгустка в поворотном магните складывается, и лучи образуют плоский веер (рис. 4, б), в котором вертикальная расходимость лучей опять же измеряется углом $\psi \approx 2/\gamma$, а горизонтальная расходимость уже определяется величиной дуги $\Delta\theta$.

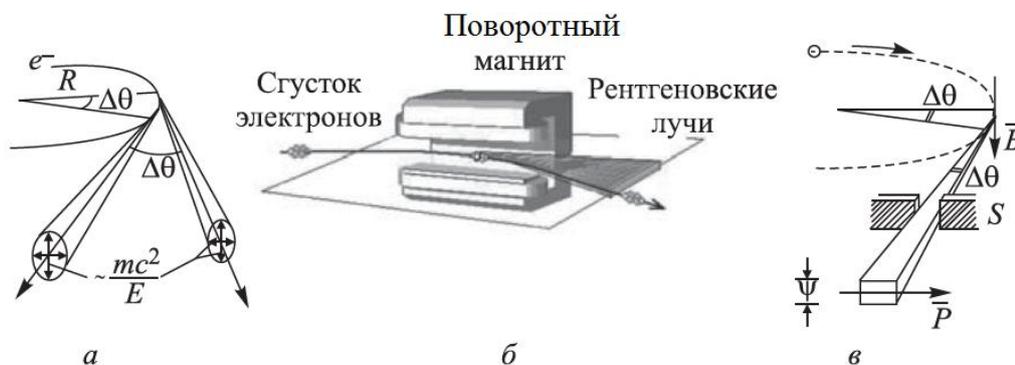


Рисунок 4 – Форма пучка рентгеновских лучей, испускаемых релятивистскими электронами, движущимися по криволинейной траектории в поворотном магните синхротрона, и отбор этого излучения каналом S с угловой апертурой $\Delta\theta$. Вектор P указывает направление поляризации излучения: (а) форма пучка лучей от каждого отдельного электрона в банче представляет конус с углом раствора $\sim mc^2/E = 1/\gamma$; (б) форма суммарного пучка лучей от электронного сгустка; (в) схема отбора излучения из некоторой «точки» накопительного кольца, где угол вертикальной расходимости пучка лучей остается равным $\psi \approx 2/\gamma$, а горизонтальная расходимость определяется размером видимой части орбиты [6].

Отбор излучения каналом вывода происходит с участка орбиты ограниченного апертурой канала, которая образует как бы ограничивающую щель шириной S (рис. 4, в), через которую могут выйти лучи лишь с дуги $\Delta\theta$. Величина расходимости пучка в вертикальном направлении определяется Лоренц-фактором γ и равна $\psi \approx 2/\gamma = 2mc^2/E$, то есть составляет приблизительно 0,5 мрад ($\sim 0,028^\circ$) при энергии электронов 2 ГэВ. Столь малая расходимость лучей — это уникальное свойство пучков СИ. Вертикальное сечение пучка практически совпадает с размером поперечного сечения сгустка в месте отбора

излучения и не превышает 3–5 мм даже на расстоянии 4 м от орбиты электронного пучка.

Излучение электронов, движущихся в системах типа «короткого магнита», обладает рядом особенностей, которые помимо теоретического интереса могут иметь и практическое значение. Простейшим примером движения электронов в коротком магните является его движение по дуге окружности при условии её достаточной малости. Угол отклонения α предполагается малыми удовлетворяет условию $\alpha \ll 1/\gamma = mc^2/E$ (рис. 5).

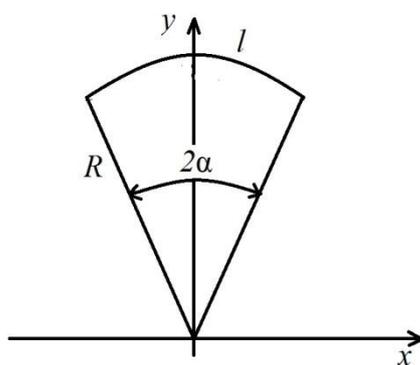


Рисунок 5 – Движение электрона по дуге окружности.

Общий характер углового распределения мощности излучения в коротком магните совпадает со свойствами синхротронного излучения. Поляризационные свойства также сохраняются. Однако можно наблюдать серьезные отличия излучения электронов в коротком магните от синхротронного при генерации низкочастотного излучения. В коротком магните генерируется «белый шум», простирающийся от нуля вплоть до частот $\omega_{кр} = \beta\gamma^2/l$. Если считать, что $l \approx 10-100$ см, то для электрона с энергией 1 ГэВ спектр СИ в коротком магните простирается от нуля вплоть до ультрафиолетового излучения. Принципиальной особенностью излучения в коротком магните является то, что максимум излучения приходится на нулевую частоту – это так называемые «странные электромагнитные волны». Относительный вклад малых частот в излучение уменьшается с ростом углового раствора дуги, и с увеличением угла α максимум в спектре смещается в область коротких волн [7].

Классическая теория СИ развивалась как теория излучения одного электрона, движущегося в однородном магнитном поле по круговой траектории. Выводы теории нашли уверенное экспериментальное подтверждение, хотя в ускорителях и накопительных кольцах источником излучения одновременно являются 10^8 — 10^{13} частиц, либо занимающих всю орбиту (бетатрон), либо сгруппировавшихся в отдельные сгустки (синхротрон, накопительное кольцо). Явление интерференции при излучении электромагнитных волн отдельными электронами может оказать влияние на полную мощность излучения — может возникнуть когерентное СИ [7].

Так как в синхротроне (и в накопительном кольце) электроны заполняют не всю орбиту, а движутся отдельными сгустками частиц конечной протяженности с различными значениями формфактора, характеризующего распределение частиц в сгустке, фактор когерентности можно представить в виде

$$S_N = N + N(N-1)f_\nu, \quad (5)$$

где N – населённость сгустка.

ν – номер гармоники.

При этом $f_\nu = 1$ соответствует полностью когерентному излучению, а при $f_\nu = 0$ излучение некогерентно.

В предположении, что электроны в сгустке распределены симметрично около среднего положения (на азимуте равном нулю) для функции f_ν можно получить

$$f_\nu = \left[\int_{-\infty}^{\infty} w(\varphi) \cos(\nu\varphi) d\varphi \right]^2, \quad (6)$$

где $w(\varphi)$ – вероятность нахождения электронов на орбите в угловом интервале между φ и $d\varphi$. В частности, если распределение следует закону Гаусса

$$w(\varphi) = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\varphi^2}{\alpha^2}\right), \quad (7)$$

$$\text{то } f_\nu = \exp\left(-\frac{\nu^2\alpha^2}{2}\right).$$

Мощность СИ складывается из когерентной и некогерентной частей:

$$W_\nu = W^{\text{неког}}(\nu) + W^{\text{ког}}(\nu) = W(\nu)N + W(\nu)N^2 f_\nu, \quad (8)$$

при этом из последней формулы видно, что максимальное когерентное излучение может проявляться лишь в области длин волн, имеющих величину порядка размеров сгустка: $\nu \sim 1/\alpha$ (область низких частот). Интегрируя теперь мощность излучения по всем гармоникам, получим

$$W^{\text{ког}}(\nu) = \frac{e^2 c N (\sqrt{3}/\alpha)^{3/4} \Gamma^2(2/3)}{R^2 \pi \sqrt{3} \cdot 2^{1/3}} = 0,56 \frac{e^2 c N^2}{R^2 \alpha^{3/4}}, \quad (9)$$

откуда следует, что в области длинноволнового излучения сгустка с угловым размером α мощность когерентного излучения не зависит от энергии частицы.

Таким образом, излучение электронов в синхротроне оказывается некогерентным по крайней мере в области высоких частот — именно это обстоятельство обусловило согласие экспериментов с теорией излучения одного электрона: полная мощность СИ пропорциональна числу электронов. Однако в области низких частот, особенно в радиодиапазоне, когерентность может наблюдаться. Это будет в том случае, если электроны движутся сгустками, размер которых сравним с длиной волны излучения: мощность излучения может при этом сильно возрасти.

Необходимо учитывать, что как на входе в поворотный магнит, так и на выходе помимо СИ, пучок генерирует краевое излучение. Краевое излучение — это электромагнитное излучение, генерируемое заряженной релятивистской частицей при прохождении через область резкого изменения напряженности магнитного поля, сосредоточено в узком конусе, направленном строго вперед.

Формирование краевого излучения зависит от относительной длины края магнитного поля.

Краевое излучение, генерируемое пучком релятивистских электронов на краю поворотного магнита, существенно отличается от хорошо известного стандартного синхротронного излучения. Появляется интенсивный пик в угловом распределении электромагнитного излучения. Его интенсивность значительно превышает интенсивность синхротронного излучения. Кроме того, излучение, генерируемое на двух соседних краях дипольного магнита, создает интерференционную картину [8].

1.2 Дипольные магниты и источники синхротронного излучения

В ускорителях частиц с искривлённой траекторией наиболее часто используемыми элементами являются диполи. Дипольный магнит (поворотный магнит) - это магнитный элемент, создающий однородное магнитное поле. Используется, в первую очередь, для создания ведущего поля, задающего траекторию пучка заряженных частиц, а также в системах впуска/выпуска пучка, для коррекции равновесной орбиты [6].

Дипольные магниты по конструкции бывают:

- на постоянных магнитах,
- классические «тёплые» электромагниты с железным полюсом;
- импульсные с шихтованным железным ярмом или безжелезные;
- сверхпроводящие.

Диполь обеспечивает между полюсами равномерное поле, которое создаётся током, циркулирующим в катушках. Ток течёт по часовой стрелки вокруг полюсов и производит магнитное поле, направленное вниз (рис. 6).

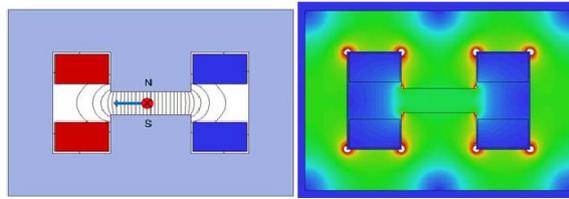


Рисунок 6 – Диполь: поперечное сечение (а), распределение 2D-поля (б) [9].

Уравнение, описывающее идеальный (бесконечный) полюс:

$$y = \pm r. \quad (10)$$

где r - полувысота промежутка. Магнитный поток плотности между этими полюсами является постоянным и имеет только компоненту в y -направлении.

В идеальном диполе могут появиться только гармоники: $n = 1, 3, 5, 7, \dots$. Они называются "разрешенные" гармоники.

Дизайн и расположение дипольного магнита могут очень отличаться от случая к случаю в зависимости от применения, можно определить три стандартных семьи, как правило, используемых в ускорителях частиц: так называемый С-магнит, Н-магнит и О-или магнит оконной рамы (рис. 7). Оптимального решения нет, у каждого типа магнита есть свои преимущества и недостатки. Выбор одного или другого идёт в соответствии с ограничениями и требованиями, такими как функция магнита, размеры и качества поля.

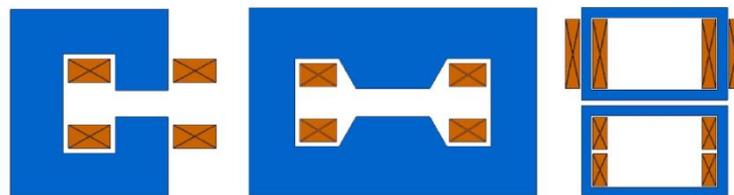


Рисунок 7 – Стандартные типы диполей: С-магнит (а), Н-магнит (б) и О-магнит (с) [9].

С-образные магниты или С-магниты (рис. 7.а) обеспечивают очень хорошую доступность трубам вывода излучения, что делает их прекрасным кандидатом источника излучения, в котором излучение синхротрона должно

извлекаться по всей окружности синхротрона. Вследствие его асимметричного расположения этот тип также подходит для инъекции и областей вывода или зон, где смежные лучи очень близко расположены друг к другу.

Объем хомута и, следовательно, вес С-магнитов значительно больше, чем Н-магниты с подобной работой. Механическая стабильность менее хороша по сравнению с Н-или О-магнитом, так как магнитные силы могут привести к движению полюсов, когда магнит работает в импульсном режиме. Для достижения высокого качества поля требуются поперечные прокладки.

Недостатком С-магнита является асимметричное распределение поля в промежутке. В отличие от Н-магнита с двойной симметрией вокруг обеих осей, у С-магнита есть только простая симметрия. Поскольку

$$NI = \oint \vec{H} d\vec{l} \quad (11)$$

должно быть постоянным, вклад в интеграл в железе есть различные длины пути, как показано на рис. 8. Конечная проходимость создаст за пределами промежутка более низкое поле, чем на внутренней части, которая производит так называемые 'запрещенные' гармоники с $n = 2, 4, 6$, и т.д. Как правило, диполь производит градиент поперек полюса 0.1% относительно центральной области. Кроме того, гармоники изменяются с насыщением и показывают нелинейное поведение в зависимости от уровня возбуждения.

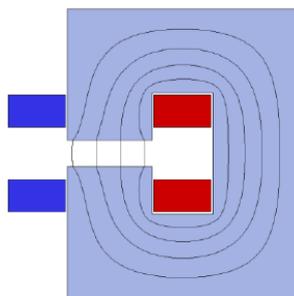


Рисунок 8 – Распределение потока в С-магните [9].

Магнит Н-типа (рис. 7.б) стандартно используется во многих ускорителях и линиях передачи луча. Доступ к катушкам и трубам вывода

излучения плох, но они обеспечивают хорошую механическую стабильность и симметричное поле. Вес железа меньше веса С-магнитов, и они обычно состоят из двух частей, чтобы позволить легкую установку катушек и вакуумной камеры. Для достижения высокого качества поля также требуются поперечные прокладки.

Если уменьшить высоту полюса Н-магнита до нуля, то достигаем так называемого расположения оконной рамы. О-магнит подобен Н-магниту с точки зрения симметрии, веса и механической стабильности, с различием в дизайне, оконная рама обеспечивает очень однородное поле даже без прокладок. Как показано на рис. 7.с, есть два основных вида такого магнита, которые используют различный дизайн катушек. Нижнее изображение представляет собой классическую оконную раму магнит с витком седло, в то время как верхняя версия использует катушки трассы, установленные вокруг вертикальных стенок. Последний менее эффективен с точки зрения возбуждения: требуется больше ампер-витков по сравнению с версией с катушки седла. Однако катушки могут также быть установлены вокруг горизонтальной стенки магнитной схемы, добавляющей вертикальную функцию изгиба. Такие объединенные горизонтально-вертикальные магниты часто используются в качестве управляющих магнитов из-за их компактного дизайна, но их эффективность низкая.

Постоянный магнит – это изделие из магнитотвёрдого материала с высокой остаточной магнитной индукцией, сохраняющее состояние намагниченности в течение длительного времени.

Постоянные магниты бывают двух типов: типа I или типа II (рис. 9). Магниты типа I имеют высокий поток утечки по бокам магнита. Энергия, запасенная в этих областях утечки, не может использоваться. Проницаемость этих материалов является большой и коэрцитивная сила (H_{cj}) обычно меньше, чем магнитная индукция насыщения ($B_r = B(H = 0)$) Типичные примеры 35%CoFe или AlNiCo. Магниты типа II имеют низкий поток утечки,

проницаемость близка к единице и H_{cj} гораздо больше, чем B_r . К этому типу относятся редкоземельные магниты, а также жесткие ферриты.

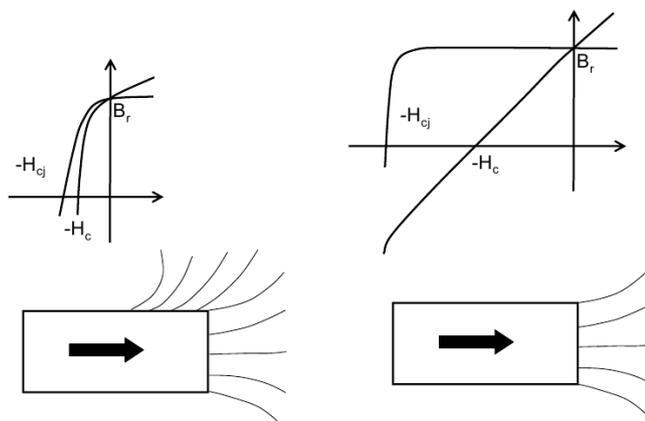


Рисунок 9 – Магниты типа I (левый) и магниты типа II (правый) [9].

На сегодняшний день источники СИ в основном являются установками коллективного пользования, на которых различные организации могут временно или постоянно использовать отдельный канал синхротронного излучения для своих работ или заказывать выполнение исследований персоналу источника.

Существуют три поколения источников синхротронного излучения. К первому относятся синхротроны и накопительные кольца, созданные для физики высоких энергий; ко второму — накопительные кольца, разработанные специально как источники СИ. Излучение в этих источниках обычно генерируется отклоняющими магнитами, и поскольку оно направлено по касательной к траектории частицы, подобно свету автомобильных фар на повороте, то его пучок имеет веерообразную форму с большим углом рассеяния.

К третьему поколению относятся накопительные кольца с длинными прямолинейными промежутками и встроенными магнитными структурами чередующейся полярности, генерирующими синхротронное излучение, которое обладает меньшими размерами пучка, более высокой интенсивностью и намного более высокой спектральной яркостью. Последний показатель

является наиболее важным параметром, так как определяет величину полезного потока фотонов. Благодаря целенаправленной работе физиков-ускорительщиков яркость источников рентгеновского СИ увеличивалась на три порядка за каждые десять лет. Тем не менее даже в самых современных источниках СИ величина «полезных» фотонов составляет лишь тысячные доли от полного светового потока, поэтому в последние десятилетие мировое физическое сообщество активно работает над проектами источников СИ нового, четвертого, поколения.

Технология накопительных колец для производства фотонов на сегодня уже практически исчерпала возможности совершенствования таких характеристик, как длительность импульса излучения, яркость и временная структура пучков СИ, и возникла потребность в поиске альтернативных технологий генерирования рентгеновских лучей, способных обойти естественные ограничения накопительных колец. В последнее время в качестве такой альтернативы рассматриваются рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) и источники СИ на базе линейных ускорителей (ЛУР) с возвратом мощности [6].

Таким образом, точные аналитические решения для синхротронного излучения существуют только для одночастичного приближения и узкого класса задач. СИ в коротком поворотном магните уже существенно отличается от излучения в синхротроне, как энергетическим спектром, так и угловым распределением, так как становится существенным вклад краевого излучения, интенсивность которого значительно превышает интенсивность синхротронного излучения.

Последние наблюдения когерентного синхротронного излучения дают основания для дальнейшего исследования зависимости этого явления от формы сгустка и его размеров.

2 Численное моделирование характеристик излучения электронов от короткого магнита на микротроне

Создание новых источников на основе СИ требует проведения детального моделирования характеристик СИ от различных магнитных устройств для различных параметров пучка ускорителя. Так как точное аналитическое решение для СИ существуют только для узкого класса задач, а для расчётов излучения от поворотных магнитов или ондуляторов необходимо использовать численные методы решения, появились различные программы по моделированию свойств СИ.

В данной работе для моделирования СИ от поворотного магнита была использована программа SPECTRA, которая представляет собой прикладное программное обеспечение для расчета характеристик СИ [10]. Такое моделирование может быть полезным для оценки энергетического спектра излучения и его мощности.

Сравнение результатов моделирования осуществлялось с результатами эксперимента представленными в [11].

2.1 Описание эксперимента по исследованию излучения в коротком магните

В качестве исходных данных для сравнения результатов моделирования были выбраны данные полученные в эксперименте по генерации когерентного СИ в коротком поворотном магните. Исследования проводились на электронном пучке микротрона со следующими параметрами: энергия электронов – 6.1 МэВ, длительность макро-импульса – 3–5 мкс, частота макро-импульсов – 1–8 Гц, длина электронного сгустка $\sigma_z \approx 2$ мм, число электронов в электронном сгустке $N_e \approx 10^8$, число сгустков в макро-импульсе $\approx 10^4$, размер пучка на выходе из микротрона - 4×2 мм², размер пучка на входе в поворотный магнит – 5×2 мм², угловая расходимость выведенного пучка – $\sigma = 0.08$ рад. Параметры пучка микротрона (σ_z) позволяют использовать когерентные

свойства излучения в миллиметровом диапазоне длин волн, так как в этом диапазоне интенсивность излучения и величина поверхностных токов возрастают на 8 порядков (пропорционально N_e) и становятся доступными для их измерения с использованием существующих детекторов [11].

Для регистрации излучения использовался детектор производства НИИ полупроводниковых приборов г. Томска на базе широкополосной антенны с высокочастотным диодом, встроенным в центр антенны. Схема эксперимента представлена на рис. 10. Генерируемое в поворотном магните СИ регистрировалось детектором, расположенным в фокусе параболического зеркала, размещенного на штанге, которая вращается вокруг оси, проходящей через центр магнита. Штанга закреплена на краю поворотного магнита. Для исключения влияния эффекта предволновой зоны измерения проводились с помощью параболического телескопа по методике, представленной в [12]. При таких условиях измеренные угловые характеристики излучения будут совпадать с характеристиками, измеренными в дальней зоне.

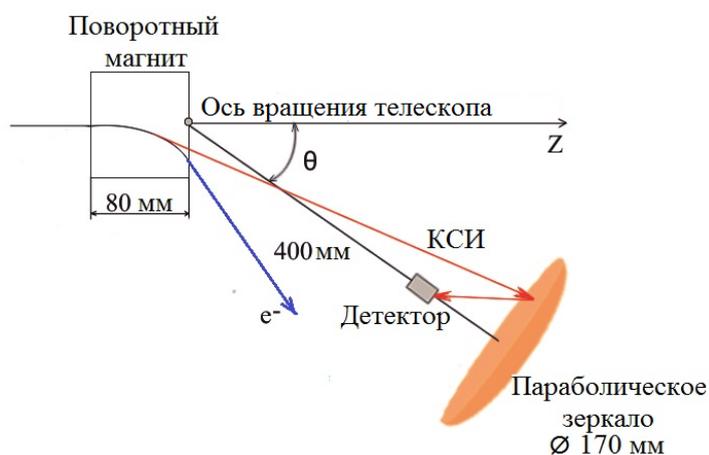


Рисунок 10 – Схема эксперимента.

Для генерации СИ использовался постоянный магнит со следующими характеристиками: длина магнита $L=80$ мм, максимальная напряжённость магнитного поля $H=0.19$ Т, угол поворота пучка 52° , радиус поворота пучка $r=101$ мм. В эксперименте измерялось угловое распределение излучения по полярному углу θ при значении азимутального угла $\psi = 0$ [11].

2.2 Применение SPECTRA для численного моделирования синхротронного излучения

Прикладное программное обеспечение SPECTRA обладает богатой функциональностью и является бесплатной для использования [10]. После первого выпуска программы в 2000 году SPECTRA была использована во многих работах по моделированию СИ [13, 14, 15, 16]. Благодаря портативности графических библиотек, принятых в SPECTRA, её поддерживают большинство платформ, таких как Microsoft Windows, Mac OS X и Linux. Текущая версия SPECTRA 10.0.07 доступна на веб-сайте [17].

SPECTRA достаточно проста в освоении и не требует никаких специальных знаний в области программирования. Она оснащена полностью графическим интерфейсом пользователя (рис. 11), который существенно упрощает работу пользователя. Результаты расчетов сохраняются в файл и представляются в графическом виде.

The screenshot displays the SPECTRA software interface, divided into two main sections: 'Accelerator Specification' and 'Light Source Description'.

Accelerator Specification

Linac

Bunch Profile: Gaussian | Injection Condition: Align Axis at Entrance

Electron Energy (GeV)	0.0061	Energy Spread	0.0001		
Average Current (mA)	32	β_x (m)	0.0625	α_x	0
Pulses/sec	2000000000	β_y (m)	0.025	α_y	0
σ_z (mm)	2	η_x (m)	0	η_x'	0
Bunch Charge (nC)	0.016	η_y (m)	0	η_y'	0
Peak Current (A)	0.956799	$1/\gamma$ (mrad)	83.7703		
Natural Emittance (m.rad)	0.00056	σ_x (mm)	5	σ_x' (mrad)	80
Coupling Constant	0.4	σ_y (mm)	2	σ_y' (mrad)	80
ϵ_x (m.rad)	0.0004	$\gamma\sigma_x$	0.9550	$\gamma\sigma_y$	0.9550
ϵ_y (m.rad)	0.00016				

Light Source Description

Bending Magnet

B(T)	0.185	Critical Energy (eV)	0.00457793
Bending Radius (m)	0.109986	Total Power/Revolution (kW)	3.56357e-08
Nominal Field Length (m)	0.045	Linear Power Density (kW/mrad)	5.67161e-12
Fringe Field Length (m)	0.015		

Рисунок 11 – Графический интерфейс программы SPECTRA с заданными параметрами.

С помощью графического интерфейса пользователя можно редактировать параметры пучка электронов и источник СИ. К параметрам

пучка относятся: энергия электронов, средний ток, длина сгустка, эмиттанс, и так далее. Параметры источника СИ включают в себя индукцию магнитного поля и его периодическую структуру, или данные профиля поля магнита, заданного пользователем. Параметры условия наблюдения СИ включают диапазон энергии фотонов или позиции наблюдения, количество гармоник ОИ и так далее.

Для расчета характеристик СИ требуется указать тип ускорителя и источника СИ (например, встроенный поворотный магнит или задать произвольное распределение магнитного поля путем импорта данных), параметры пучка, а также параметры области наблюдения спектра в соответствии с заданным диапазоном чувствительности и свойств детектора. Для поворотных магнитов алгоритмы численных вычислений основаны на известных выражениях для СИ. Расчеты в программе могут проводиться в ближней зоне и дальней зоне. В обоих методах электрон предполагается релятивистским. Для сокращения времени вычислений численный метод реализован в предположении, что пространственный профиль электронного пучка является медленно меняющейся функцией продольной координаты. Перед расчетом когерентного излучения необходимо предварительно проверить соотношение длины сгустка и длины волны излучения, т.к. если длина сгустка окажется намного больше длины волны, излучение приравнивается нулю. Следует отметить также, что при расчетах когерентного СИ спонтанное излучение не учитывается. Расчет когерентного излучения проводится в ближней зоне с учетом временной и пространственной когерентности [10].

На рис. 12.а представлен схематичный рисунок поворотного магнита, используемого в эксперименте. На рис. 12.б показано распределение магнитного поля в центре поворотного магнита используемого в эксперименте и поле поворотного магнита встроенного в SPECTRA, которое использовалось при моделировании СИ. Параметрами, определяющими вид поля поворотного

магнита в SPECTRA, являются: максимальная магнитная индукция, длина плато при максимальном значении магнитной индукции и длина спада поля на краях магнита. Параметры Nominal Field Length и Fringe Field Length позволяют подобрать распределение встроенного магнитного поля максимально близким к полю магнита, используемого в эксперименте. Распределение магнитного поля в вертикальной плоскости $Y-Z$ постоянно и одинаково для всех сечений вдоль оси X .

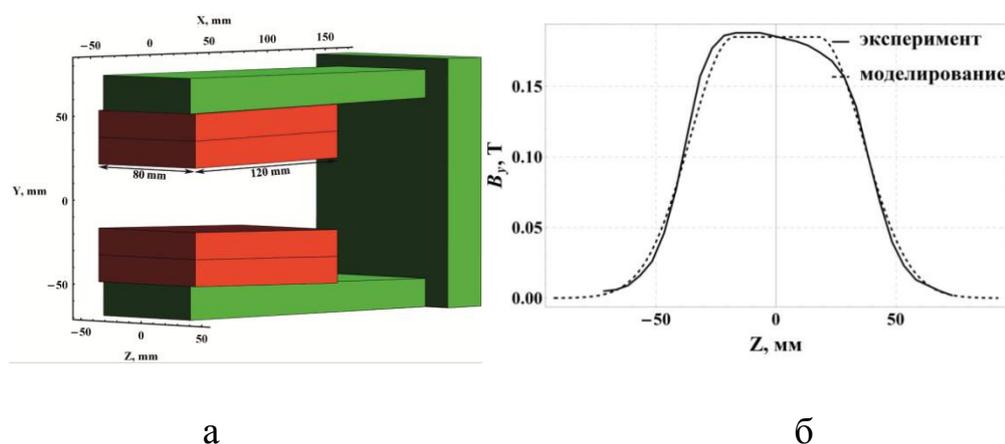


Рисунок 12 – Схема магнита (а) и распределение индукции магнитного поля (б).

Исходя из заданных параметров, SPECTRA позволяет построить траекторию пучка в поворотном магните (рис. 13). Угол поворота пучка 50° , радиус поворота пучка $r=110$ мм.

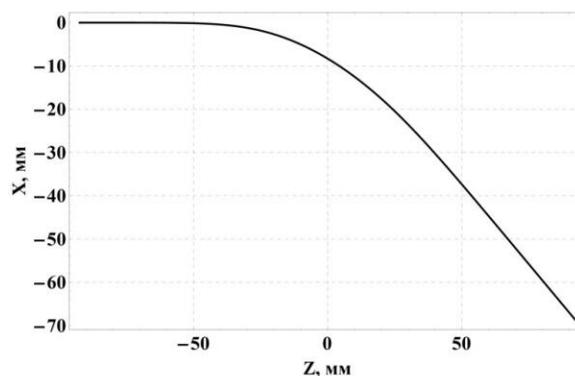


Рисунок 13 – Траектория электронного пучка в поворотном магните.

В таблице 1 представлены параметры пучка электронов и поворотного магнита, для которых проводилось моделирование.

Таблица 1 – Параметры пучка электронов и поворотного магнита

Параметр	Значение
Энергия электронов	6.1 МэВ
Частота макро-импульсов	8 Гц
Длительность макро-импульса	5 мкс
Число сгустков	10^4
Населённость сгустка	10^8
Длина электронного сгустка (r.m.s.)	2 мм
Размер пучка на входе в магнит	$5 \times 2 \text{ мм}^2$
Угловая расходимость пучка	80 мрад
Эмиттанс горизонтальный	0.4 мм·рад
Эмиттанс вертикальный	0.16 мм·рад
Максимальная индукция магнитного поля	0.185 Т
Длина магнита	80 мм
Расстояние до плоскости наблюдения	6 м

В SPECTRA при расчете углового распределения центром системы координат является центр магнита, данное условие необходимо учитывать, т.к. в эксперименте центром является край магнита.

В качестве тестовых расчетов было выполнено моделирование характеристик спонтанного СИ. На рис. 14 представлены угловое распределение плотности потока излучения без учета (а) и с учетом (б) поперечных размеров пучка, исследуемая длина волны излучения $\lambda = 11 \text{ мм}$ (0,113 миллиэВ). На рис. 15 представлены их угловые полярные (а) и азимутальные (б) распределения плотности потока спонтанного СИ без учета и с учетом поперечных размеров пучка.

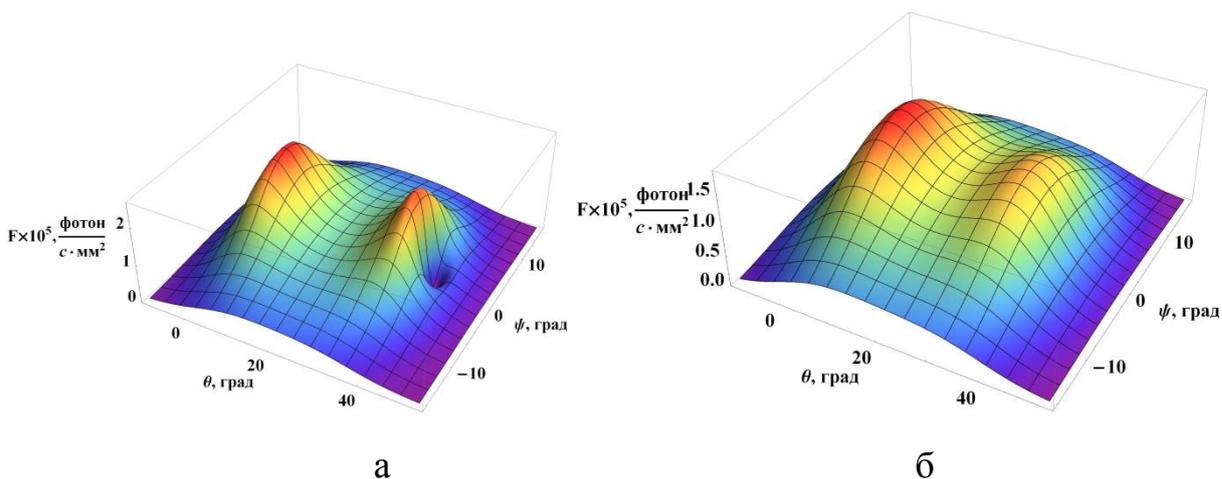


Рисунок 14 – Угловое распределение плотности потока спонтанного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечных размеров пучка. θ - полярный угол распределения, ψ - азимутальный угол.

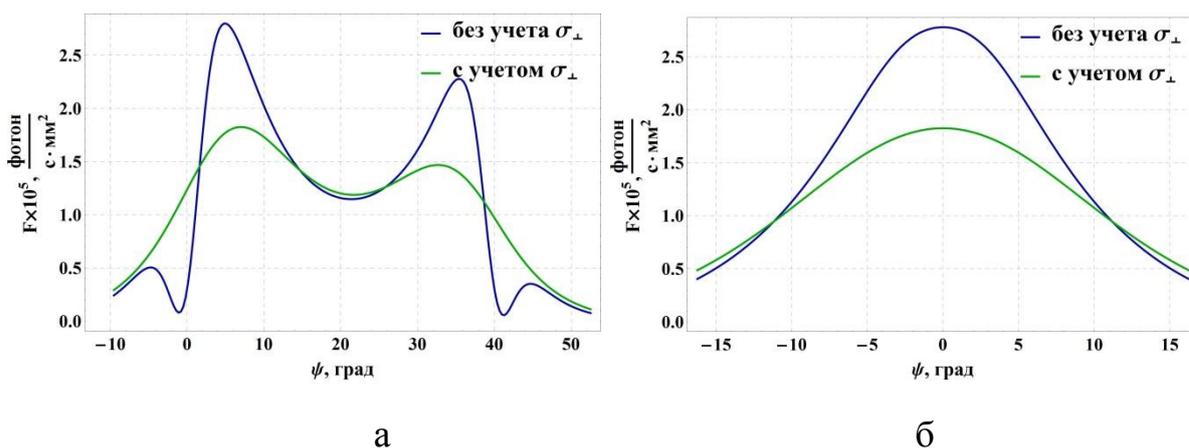


Рисунок 15 – Угловое полярное (а) и азимутальное (б) распределение плотности потока спонтанного СИ в максимуме с учетом поперечного размера пучка.

Как видно из графиков (рис. 14,15), угловое распределение СИ имеет 2 ярко выраженных пика, которые соответствуют моментам влёта и вылета пучка из поворотного магнита и характеризуются вкладом в СИ краевого излучения, что соответствует теоретическим расчетам, представленным в [10]. Учет поперечного размера пучка уширяет угловое распределение СИ и снижает его интенсивность в пиках.

На рис. 16 представлен спектр спонтанного СИ с учетом поперечного размера пучка.

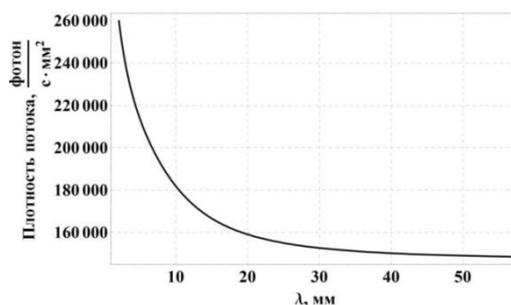
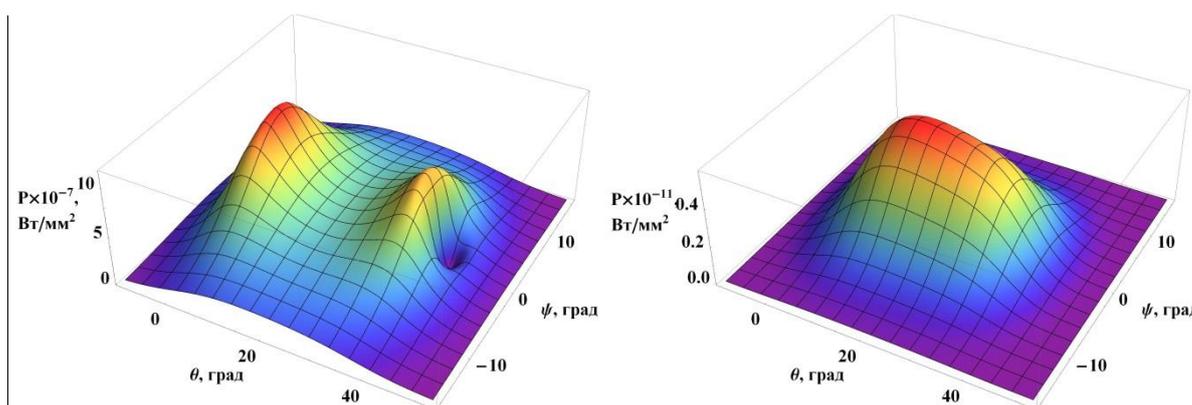


Рисунок 16 – Спектр спонтанного СИ.

Учитывая характер углового распределения СИ, спектр излучения (рис. 16) рассчитан в направлении соответствующем максимальному значению плотности потока СИ ($\theta=5.2^\circ$) с учетом поперечного размера пучка. Из графика (рис. 16) видно, что с уменьшением длины волны излучения плотность потока спонтанного СИ возрастает.

На рис. 17 представлено угловое распределение плотности мощности спонтанного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка, рассчитанной во всём спектральном диапазоне излучения (рис. 16).



а

б

Рисунок 17 – Угловое распределение мощности спонтанного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка.

Учет поперечного размера пучка снижает интенсивность СИ в пиках, и угловое распределение принимает вид распределения СИ в синхротроне, т.е. сосредоточено в конусе с полным раствором $\Delta\theta \sim 2\gamma$.

2.3 Результаты моделирования характеристик излучения от короткого магнита

Так как свойства когерентного СИ зависят от размера сгустков, моделирование углового распределения излучения проведено при нескольких значениях длин сгустков.

На рис. 18 – 20 приведены угловые распределения плотности потока когерентного СИ без учета и с учетом поперечного размера пучка для длин сгустка равных 1.7, 2 и 2.3 мм, исследуемая длина волны излучения $\lambda = 11$ мм.

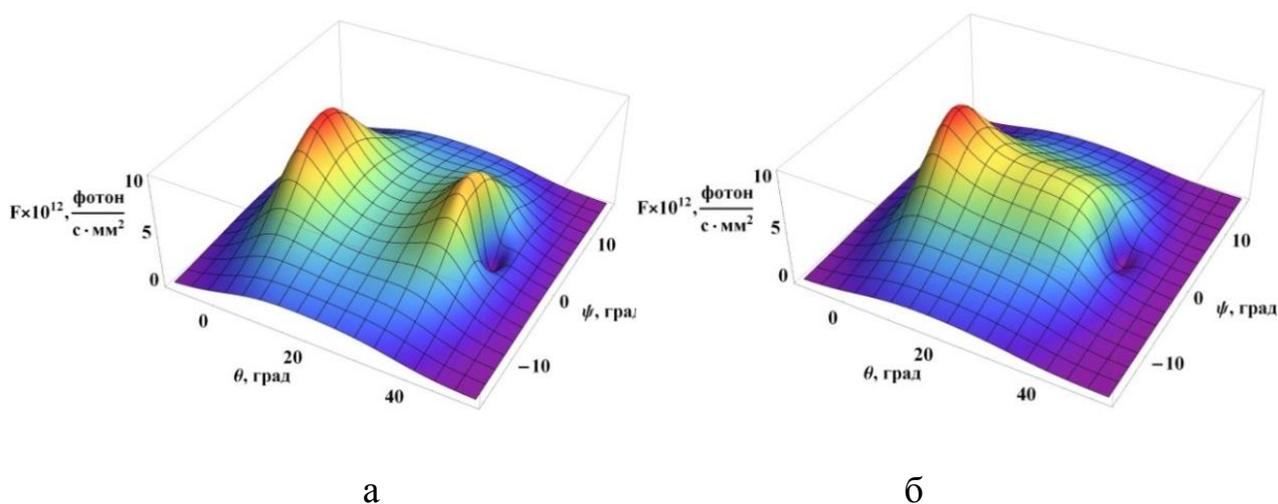


Рисунок 18 – Угловое распределение плотности потока когерентного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка. Длина сгустка равна 1.7 мм.

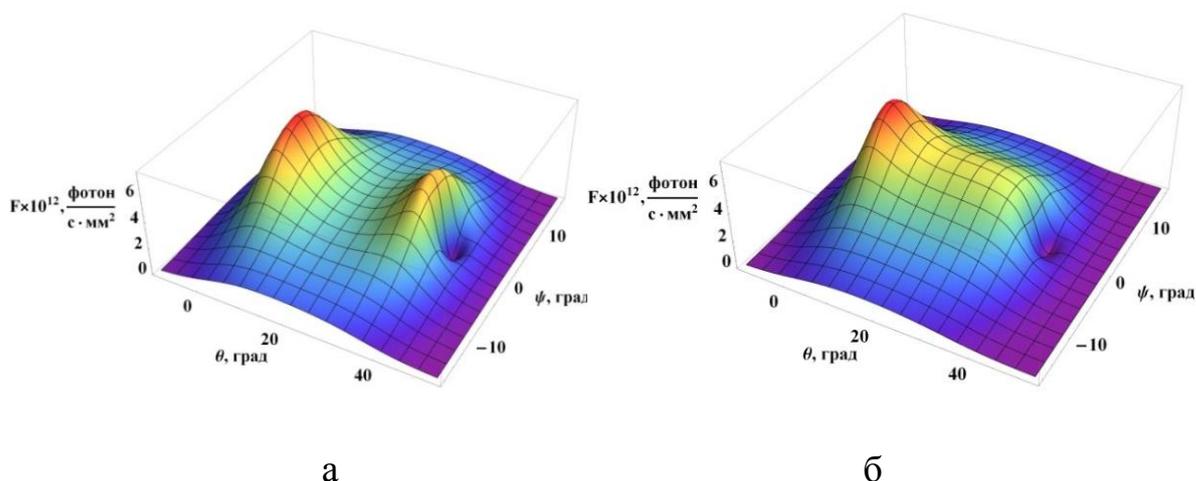


Рисунок 19 – Угловое распределение плотности потока когерентного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка. Длина сгустка равна 2 мм.

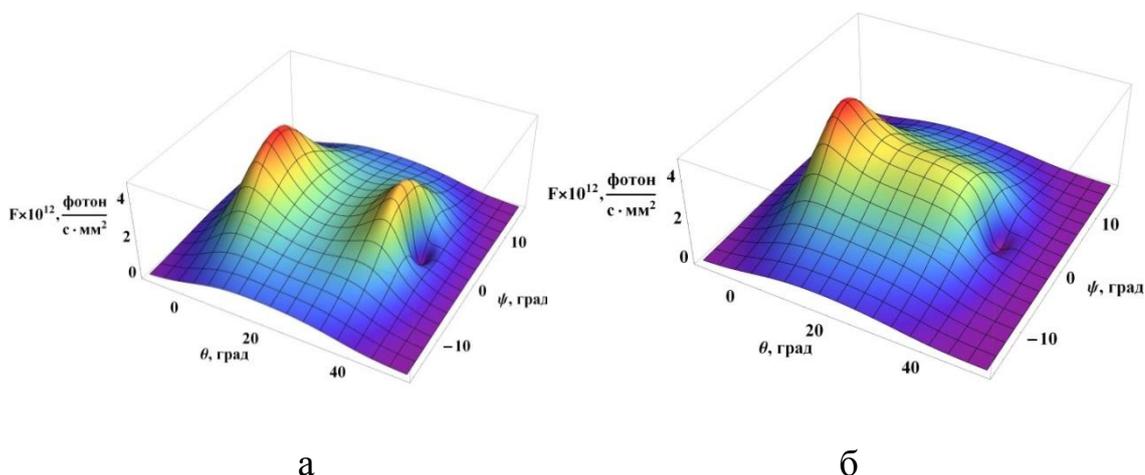


Рисунок 20 – Угловое распределение плотности потока когерентного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка. Длина сгустка равна 2.3 мм.

Положению максимума излучения соответствует угол $\theta=5.2^\circ$, в распределении без учета поперечных размеров пучка второму пику соответствует угол $\theta=34^\circ$. Положение пиков с изменением длины сгустков остаётся постоянным. Увеличение длины сгустка снижает интенсивность когерентного СИ, населённость сгустка при этом остаётся постоянной, что полностью соответствует ожиданиям. А учет поперечного размера пучка формирует в распределении плато.

На рис. 21 представлены спектры когерентного СИ при разных значениях длин сгустка с учетом поперечного размера пучка.

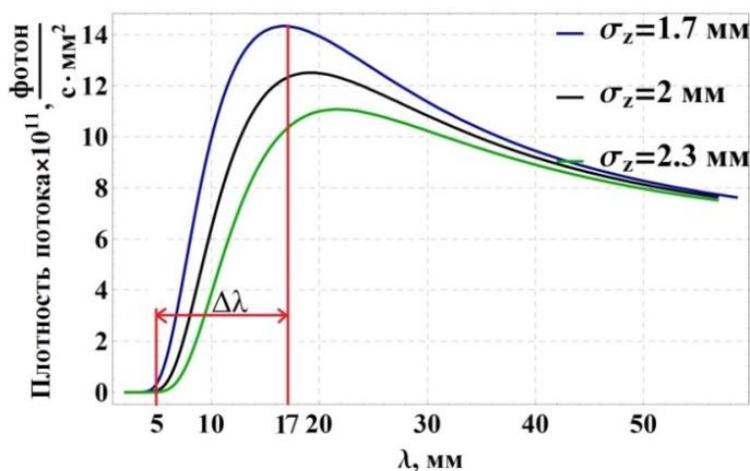


Рисунок 21 – Спектры когерентного СИ при разных значениях длин сгустка с учетом поперечного размера пучка. $\Delta\lambda$ определяет диапазон частот, регистрируемых детектором.

Представленные на рис. 21 спектры когерентного СИ рассчитаны в направлении $\theta=5.2^\circ$, соответствующем максимальной интенсивности излучения. Вертикальные линии устанавливают пределы регистрируемых в эксперименте длин волн когерентного СИ, нижний предел $\lambda_{\min}=5$ мм определяется порогом когерентности, и верхний предел $\lambda_{\max}=17$ мм определяется запердельным волноводом, который использовался для подавления фона от ВЧ системы ускорителя [12]. Из графиков (рис. 21) видно, что с уменьшением длины сгустка плотность потока излучения возрастает и спектр сдвигается в область коротких длин волн.

Для анализа вида углового распределения интенсивности когерентного СИ, был оценён вклад излучения конкретных длин волн (рис.22, 23). В расчетах длину сгустка (r.m.s.) приняли равной 2 мм.

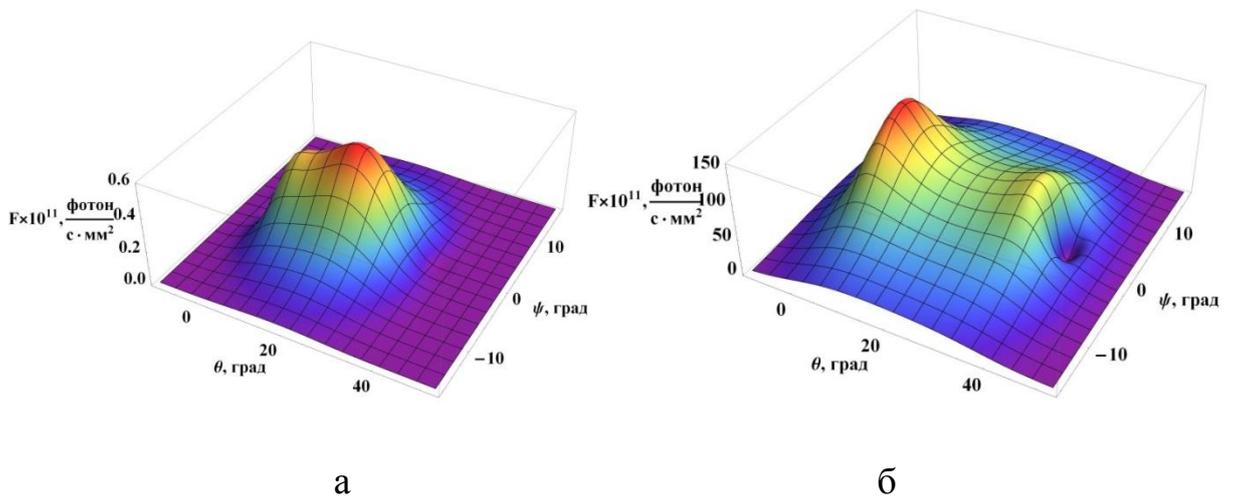


Рисунок 22 – Угловое распределение плотности потока когерентного СИ для длин волн равных 5 (а) и 17 (б) мм.

На рис. 22 представлены угловые распределение плотности потока когерентного СИ с учетом поперечного размера пучка для длин волн равных 5 и 17 мм. Положению пика излучения, длина волны которого равна 5 мм, соответствует углу $\theta=20^\circ$. Положению пиков излучения, длина волны которого равна 17 мм, соответствуют углы $\theta=5^\circ$ и $\theta=35^\circ$. Из графиков можно сделать вывод, что увеличение длины волны от 5 до 17 мм уширяет распределение и увеличивает интенсивность излучения в пиках на 2 порядка.

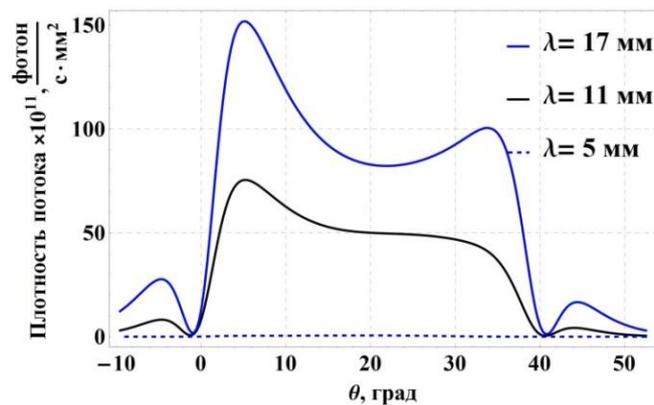


Рисунок 23 – Угловое полярное распределение плотности когерентного СИ при разных значениях длин волн излучения с учетом поперечного размера пучка.

Из графиков видно (рис.23), что с увеличением длины волны излучения возрастает плотность потока когерентного СИ, особенно в направлении влёта и вылета пучка в поворотном магните. Положение пика остаётся постоянным.

На рис. 24 представлены линейная (а) и эллиптическая (б) поляризации когерентного СИ, рассчитанные с учетом поперечного размера пучка для излучения, длина волны которого $\lambda=11$ мм. Исследуемая длина сгустка $\sigma_z=2$ мм.

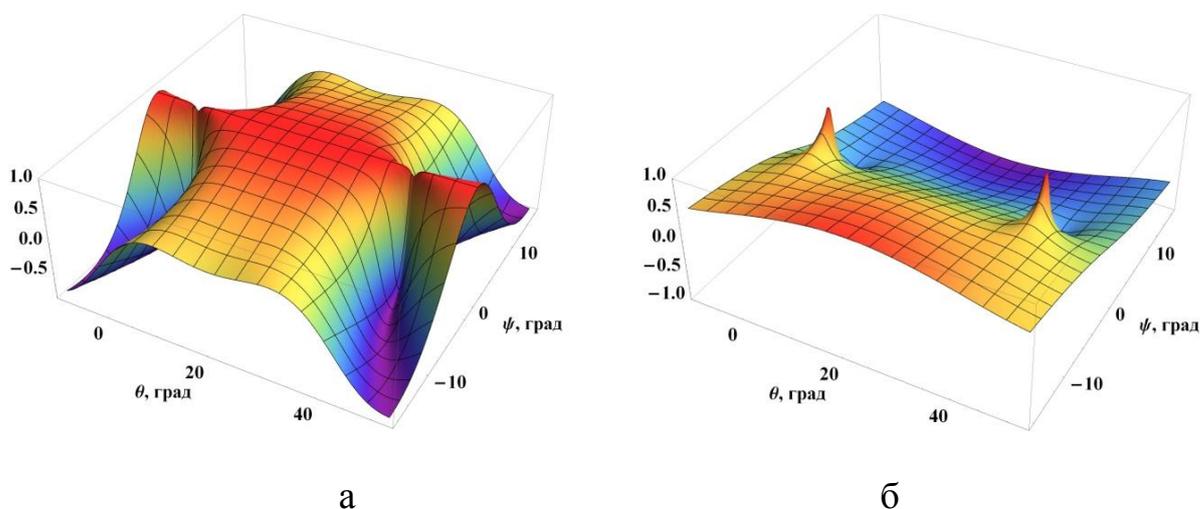


Рисунок 24 – Линейная (а) и эллиптическая (б) поляризации когерентного СИ.

Из графиков видно, что когерентное СИ в плоскости орбиты движения электрона полностью линейно – поляризовано. Над плоскостью движения можно наблюдать правую, а ниже плоскости — левую эллиптическую поляризацию, что полностью соответствует теории.

Угловое распределение мощности когерентного СИ вычисляется с учетом диапазона спектральной чувствительности детектора, в котором чувствительность приравнивалась к 1 (рис. 25).

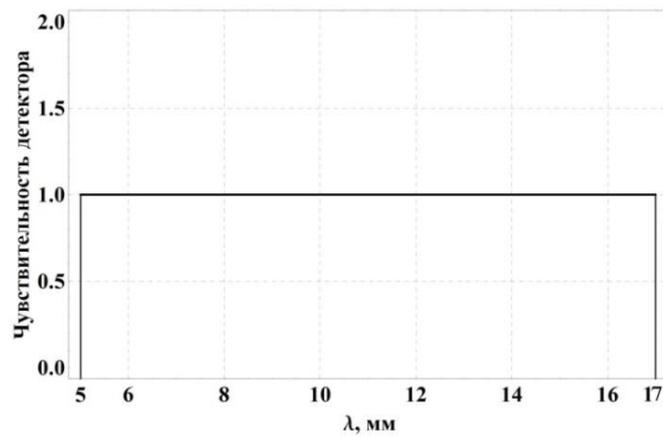


Рисунок 25 – Спектральная чувствительность детектора.

На рис. 26 представлена зависимость плотности мощности излучения в пике когерентного СИ от населённости сгустка, рассчитанная с учетом спектрального диапазона чувствительности детектора. Параметры сгустка представлены в табл. 1.

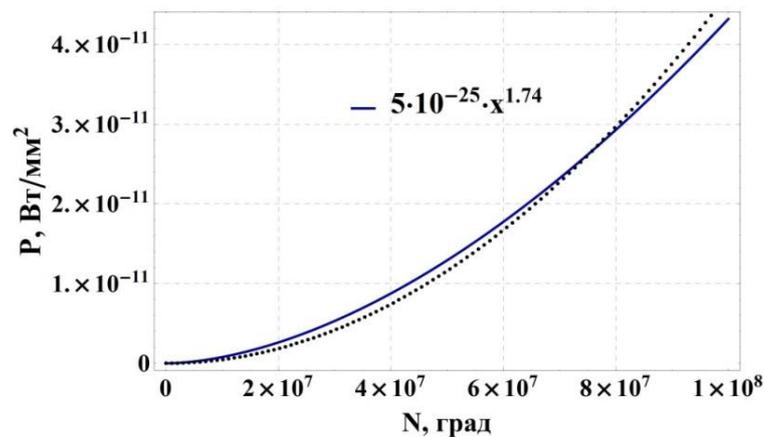


Рисунок 26 – Зависимость интенсивности когерентного СИ от населённости сгустка.

Точками обозначены результаты моделирования, а сплошной линией – аппроксимация данного моделирования. Как видно из графиков, интенсивность излучения имеет практически квадратичную зависимость и возрастает пропорционально населённости сгустка, как того и следовало ожидать для когерентного излучения.

На рис. 27–29 приведены угловые распределения мощности когерентного СИ без учета и с учетом поперечного размера пучка для длин сгустка равных 1.7, 2 и 2.3 мм.

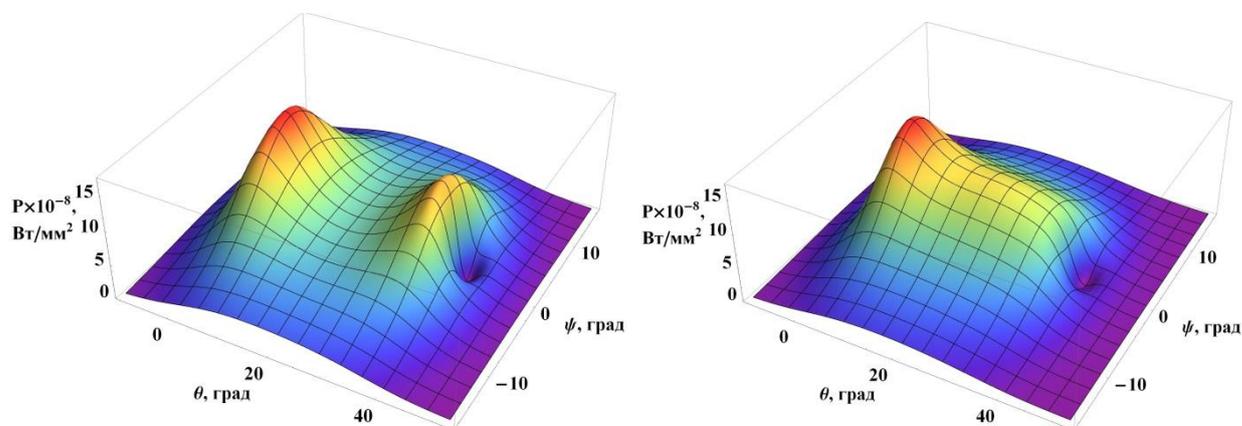


Рисунок 27 – Угловое распределение мощности когерентного СИ без учета (левый) и с учетом (правый) поперечного размера пучка. Длина сгустка равна 1.7 мм.

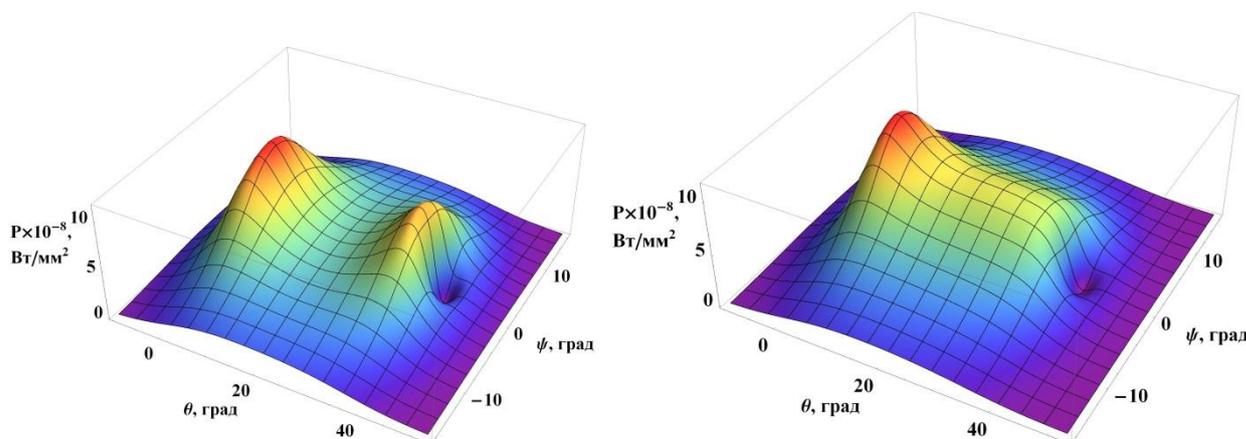


Рисунок 28 – Угловое распределение мощности когерентного СИ без учета (левый) и с учетом (правый) поперечного размера пучка. Длина сгустка равна 2 мм.

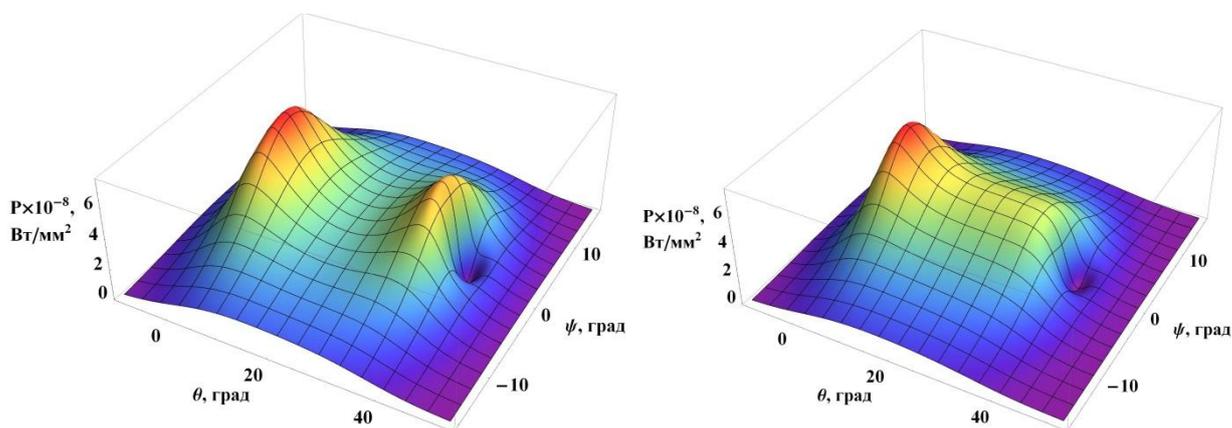


Рисунок 29 – Угловое распределение мощности когерентного СИ без учета (левый) и с учетом (правый) поперечного размера пучка. Длина сгустка равна 2.3 мм.

Как и предполагалось, с учетом поперечного размера пучка наблюдается формирование плато углового распределения мощности излучения, и увеличение интенсивности с уменьшением длины сгустка.

На рис. 30 представлены угловые полярные распределения мощности когерентного СИ при разных значениях длин сгустка с учетом поперечного размера пучка.

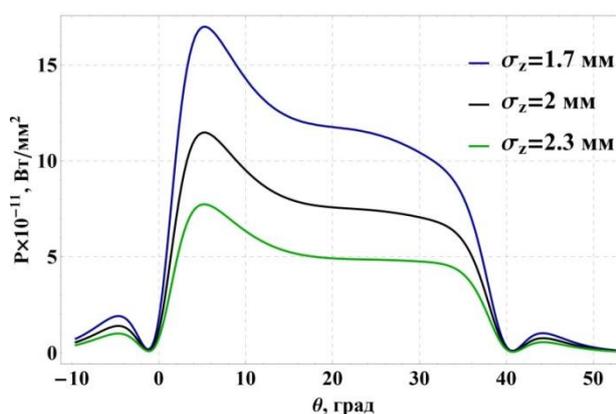


Рисунок 30 – Угловое полярное распределение мощности когерентного СИ при разных значениях длин сгустка с учетом поперечного размера пучка.

Как видно из рис. 30 с уменьшением длины сгустка плато в распределении когерентного СИ начинает спадать по мере движения электронов, положение максимума излучения при этом остаётся постоянным.

Помимо длины сгустка, параметром определяющим размер пучка является его угловая расходимость, которая также определяет вид углового распределения. На рис. 31–33 представлены угловые распределения мощности когерентного СИ в коротком поворотном магните при угловой расходимости 40, 60 и 100 мм·рад, с учетом (а) и без учета (б) поперечного размера пучка. Длина сгустка равна 2 мм. В предыдущих и последующих расчетах угловую расходимость пучка приняли равной 80 мм·рад.

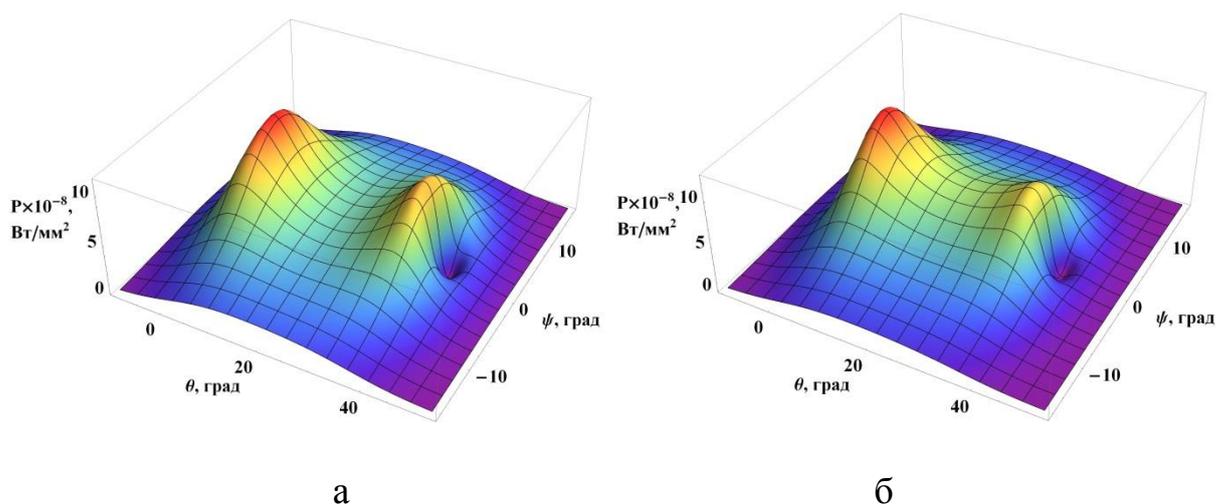


Рисунок 31 – Угловое распределение мощности когерентного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка. Угловая расходимость пучка равна 40 мм·рад.

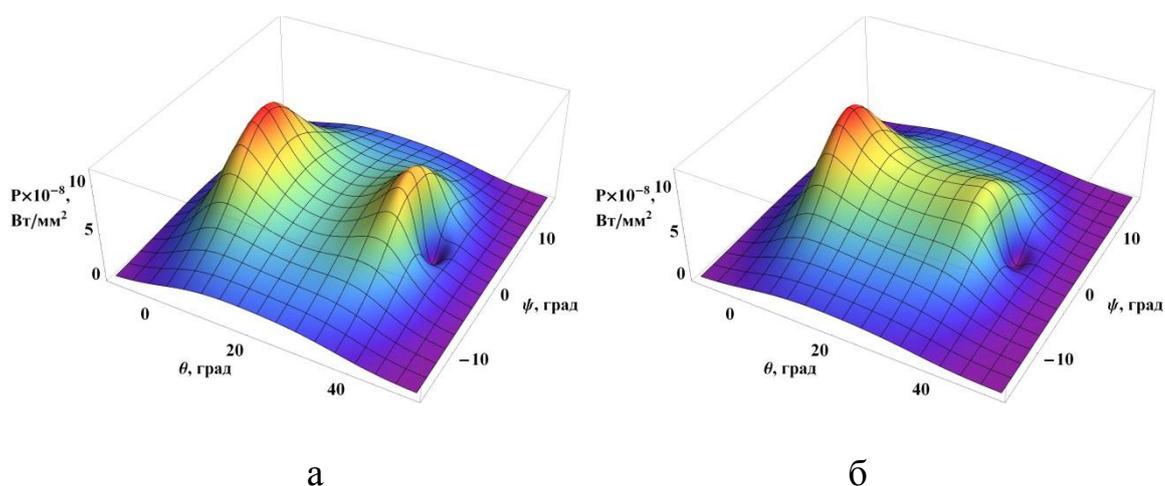


Рисунок 32 – Угловое распределение мощности когерентного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка. Угловая расходимость пучка равна 60 мм·рад.

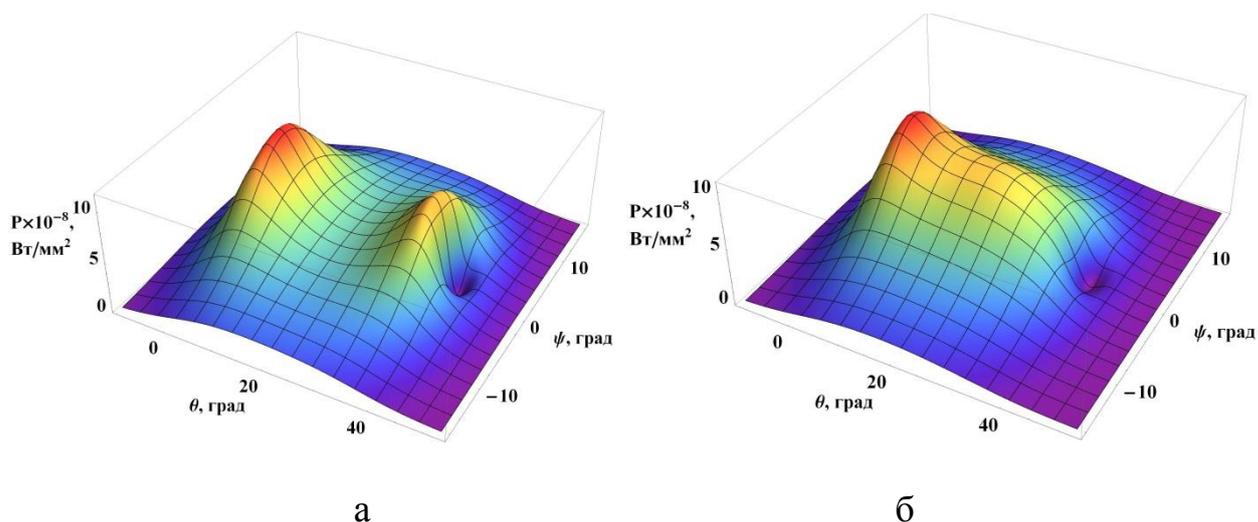


Рисунок 33 – Угловое распределение мощности когерентного СИ без учета (а) и с учетом (б) поперечного размера пучка. Угловая расходимость пучка равна 100 мм·рад.

Как видно из графиков (рис 31–33) с уменьшение угловой расходимости возрастает интенсивность излучения во втором пике, соответствующем вылету электронного пучка из поворотного магнита.

Так как центры системы координат в эксперименте и в SPECTRA не совпадают (рис. 34), необходима коррекция углового распределения по полярному углу. Расхождение в наблюдении СИ по полярному углу от позиции наблюдения представлено на рис. 35, где $\Delta\theta$ – разность между полярными углами наблюдения θ в эксперименте и моделировании.

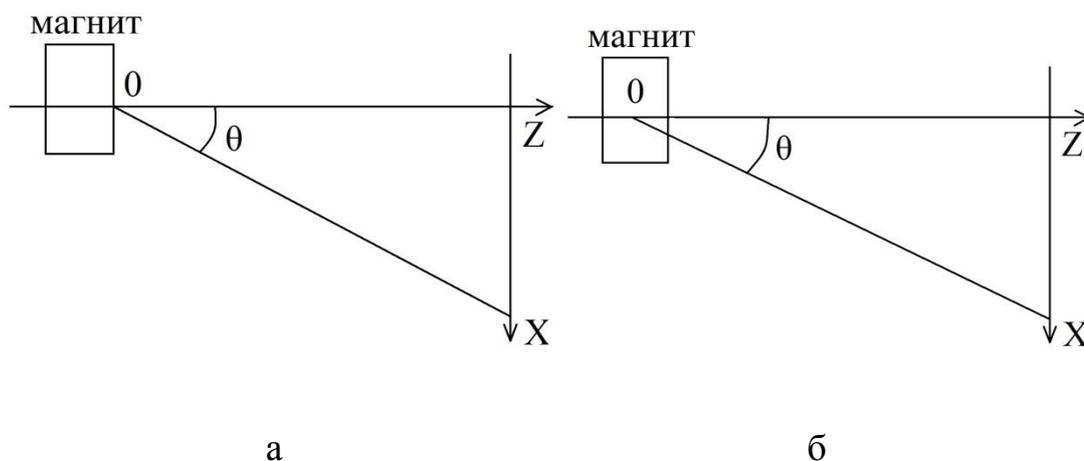


Рисунок 34 – Схема наблюдения излучения в эксперименте (а) и моделировании (б) в SPECTRA.

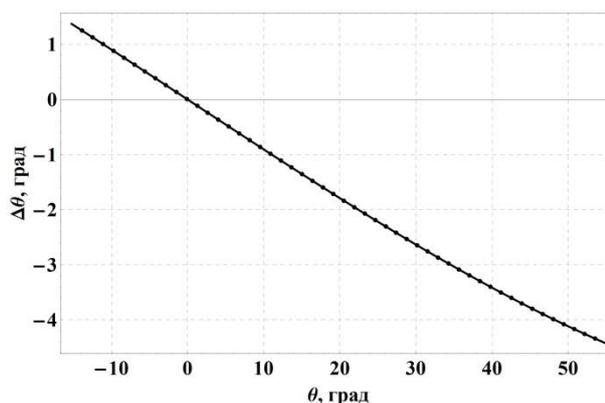


Рисунок 35 – Зависимость разности полярных углов наблюдения СИ в эксперименте и в SPECTRA от позиции наблюдения излучения по полярному углу в эксперименте.

Для оценки точности моделирования характеристик когерентного СИ, сравнение результатов вычисления осуществляется с результатами эксперимента [10]. На рис. 36 представлено угловое полярное распределения когерентного СИ в дальней зоне полученное в эксперименте и рассчитанное в SPECTRA, нормированное на интенсивность в пике экспериментального распределения пучка. Моделирование проводилось для параметров электронного пучка представленных в табл. 1.

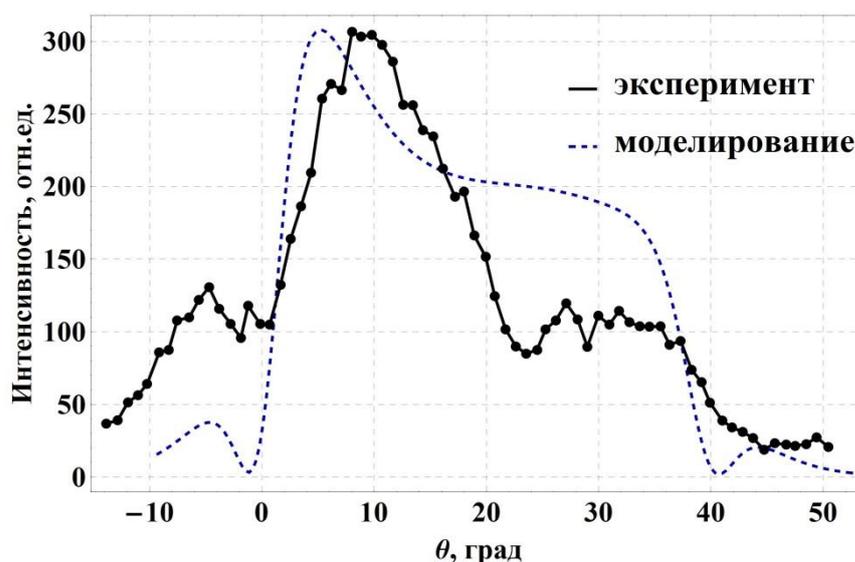


Рисунок 36 – Угловые полярные распределения когерентного СИ в коротком поворотном магните полученные в эксперименте и рассчитанное в SPECTRA.

Как видно из графиков, с учетом принятых допущений: длина сгустка равна 2 мм.; угловая расходимость равна $\sigma = 80$ мм·рад, гауссова форма распределения электронов в сгустке; чувствительность детектора по всему спектру приравнивалась 1 – результаты, полученные в программе SPECTRA, качественно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Положение максимума излучения в SPECTRA соответствует углу $\theta=5.2^\circ$, в эксперименте $\theta=9.3^\circ$, расхождение в положении пиков составило 4.1°.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что свойства когерентного СИ существенно зависят от исследуемых параметров пучка. Длина сгустка и угловая расходимость пучка определяют вид углового распределения излучения. Так же существенный вклад в результаты, полученные экспериментально, вносит спектральная чувствительность детектора, т.к. вклад излучения разных длин волн не идентичен, а увеличение длины волны излучения повышает интенсивность когерентного СИ в направлении влёта и вылета электронного пучка из поворотного магнита.

Заключение

Прикладное программное обеспечение SPECTRA может быть использовано для моделирования СИ в поворотных магнитах (спектр, угловые распределения, поляризация) с учётом реальных параметров электронного пучка, ускорителя и магнитного поля.

Выводы

1. Результаты моделирования содержат данные как спонтанного, так и когерентного СИ в коротком поворотном магните. Все параметры представлены в абсолютных единицах. Характеристики когерентного СИ (спектр, угловое распределение) существенно зависят от таких параметров пучка, как длина сгустка и угловая расходимость.

2. Результаты, полученные в программе SPECTRA, качественно хорошо согласуются с экспериментальными данными по генерации когерентного СИ в коротком поворотном магните: большая часть интенсивности излучения сосредоточено в конусе с углом раствора порядка 2γ , положение максимумов практически совпадает, расхождение составляет 4.1° .

Результаты учебно-исследовательской работы за время обучения прошли апробацию на следующих конференциях:

— VII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» июнь 2015 г. Томск. Доклад «Расчёт магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX@КЕК».

— VII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» июнь 2015 г. Томск. Доклад «Моделирование характеристик ондуляторного излучения для параметров ускорителя LUCX@КЕК».

— Международная молодежная конференция Физика.СПб/2015 г. Санкт-Петербург. « Моделирование магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX в программе Radia ».

— XLVI Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК–2016) июнь 2016 г. в Москве в Московском Государственном Университете. «Обзор современных средств численного моделирования синхротронного излучения».

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности 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.

Коммерческая привлекательность научного исследования определяется как превышением технических параметров над предыдущими разработками, так и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на вопросы – будет ли продукт востребован рынком; какова будет его цена; каков бюджет научного проекта; какой срок потребуются для выхода на рынок и т.д.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;

- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

- планирование научно-исследовательских работ;

- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования [20].

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

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В данной работе проводилось исследование характеристик излучения электронов умеренно релятивистских энергий в поворотных магнитах. Было проведено численное моделирование характеристик синхротронного излучения от поворотного магнита в программе Spectra. На данном этапе говорить о коммерческом потенциале данного исследования рано. В связи с этим анализ потенциальных потребителей результатов сделан не был. Такое моделирование может быть полезным организациям, использующим ускорительную технику и нуждающимся в определении вклада синхротронного излучения в излучение от пучков заряженных частиц. В качестве заинтересованных могут выступать организации, сфера деятельности которых затрагивает следующие области:

- В аномальной дифракции для решения фазовой проблемы в рентгеноструктурном анализе макромолекулярных кристаллов;
- Стерилизация продуктов питания, медицинского оборудования и материалов (электроны);
- Источник гамма-излучения для рентгеновской дефектоскопии (электроны);
- В микроручевой терапии;
- В различных диагностических процедурах, например в ангиографии, маммографии, денситометрии.

Самое главное преимущество использования данного моделирования будет состоять в возможности определения свойств синхротронного излучения от различных источников излучения. Также в связи с богатой функциональностью в программе Spectra, появится возможность моделировать характеристики синхротронного излучения в соответствие с необходимыми параметрами.

3.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 2. В качестве конкурирующих разработок были приняты: теоретическое моделирование характеристик синхротронного излучения (К1) и моделирование в программе SRW (К2). Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле (12):

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (12)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Из данного анализа можно судить о явном преимуществе выбранного в данной работе метода.

Таблица 2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_ϕ	B_{K1}	B_{K2}	K_ϕ	K_{K1}	K_{K2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,22	5	2	1	1,1	0,44	0,22

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
2. Помехоустойчивость	0,1	4	2	4	0,4	0,2	0,4
3. Качество интеллектуального интерфейса	0,2	5	1	4	1	0,2	0,8
4. Надежность	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
5. Потребность в ресурсах памяти	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
6. Простота эксплуатации	0,01	5	2	3	0,05	0,02	0,03
7. Удобство в эксплуатации	0,05	5	2	3	0,25	0,1	0,15
8. Функциональная мощность	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
2. Уровень проникновения на рынок	0,01	5	1	4	0,05	0,01	0,04
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
4. Цена	0,01	5	5	3	0,05	0,05	0,03
Итого	1				4,6	2,62	3,27

Как показал анализ, моделирование в программном обеспечении Spectra наиболее конкурентоспособна, так как наиболее проста и удобна в эксплуатации, а также существует уже более 15 лет.

3.1.3 SWOT-анализ

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

SWOT-анализ заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

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.

Сильными сторонами использования СИ от поворотного магнита, расчет которого производится в программе Spectra можно назвать следующие свойства и особенности:

- возможность реализовать большое количество изменяющихся параметров системы (энергия пучка, длина волны, размер и форма поворотного магнита и тд.);
- согласованность с известными исследованиями;
- отсутствие необходимости знаний языков программирования.

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.

Слабыми сторонами данной разработки можно назвать следующие свойства и особенности:

- длительность расчетов;
- необходимость наличия пакета программ Wolfram Mathematica;

– высокая стоимость пакета программ Wolfram Mathematica.

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.

К возможностям данного проекта можно отнести:

- свободный доступ;
- простота в освоении;
- использование для разнообразных задач.

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.

К угрозам можно отнести:

- поломка ЭВМ;
- отсутствие коммерческого интереса к проекту;
- недостаточная точность расчетов.

В таблице 3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 3 – Интерактивная матрица проекта

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

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение. Подобные матрицы также были построены для сильных угроз, слабых возможностей и слабых угроз.

В таблице 4 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 4 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: – С1. согласованность с известными исследованиями; – С2. возможность реализовать большое количество изменяющихся параметров системы (энергия пучка, длина волны, размер и форма мишени и тд.); – С3. отсутствие необходимости знаний языков программирования.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: – Сл1. длительность расчетов; – Сл2. необходимость наличия пакета программ Wolfram Mathematica; – Сл3. высокая стоимость пакета программ Wolfram Mathematica.</p>
--	---	--

<p>Возможности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – В1. свободный доступ; – В2. простота в освоении; – В3. использование для разнообразных задач. 	<p>1. Возможность портативного использования программы для различных задач;</p> <p>2. Доступность расчета для различных начальных условий</p>	<p>1. При написании программы можно учесть самые разные задачи</p> <p>2. Возможность независимого пользования</p>
<p>Угрозы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – У1. поломка ЭВМ; – У2. отсутствие коммерческого интереса к проекту; – У3. недостаточная точность расчетов. 	<p>1. Возможность улучшения безопасности работы с программой и анализа рынка потребителей</p>	<p>1. Возникновение трудностей при обработке большого количества данных</p>

На основе результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Эта стратегия выбрана, так как необходимо найти стабильный рынок заказов и сбыта товара.

3.2 Планирование научно-исследовательских работ

3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

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

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Основные этапы выполнения работы

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент
	6	Разработка схем геометрий	Руководитель, студент
	7	Оценка правильности полученных результатов, сравнение их с существующими	Руководитель, студент

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Обобщение и оценка результатов	8	Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель
Проведение ВКР			
Разработка технической документации и проектирование	9	Выбор параметров моделирования	Студент
	10	Моделирование	Студент
	11	Оценка эффективности применения результатов исследования	Руководитель, студент
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ВКР)	11	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент
	12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент
	14	Поиск путей оптимизации разработки	Руководитель, студент

3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула (13):

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (13)$$

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

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

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

Пример:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1.8$$

Далее расчеты проводятся аналогично.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p (14), учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (14)$$

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

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

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

Пример:

$$T_{pi} = \frac{1.8}{2} = 0.9.$$

Далее расчеты проводятся аналогично.

3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой (15):

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (15)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле (16):

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (16)$$

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

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

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

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 96 - 20} = 1,47$$

$$t_{\text{min}1} = 1$$

$$t_{\text{max}1} = 3$$

$$t_{\text{ож}1} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1,8$$

$$T_{p1} = \frac{1,8}{1} = 1,8$$

$$T_{k1} = 1,8 \cdot 1,47 = 3$$

На основе полученных выше расчетов строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работы в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в приложении Б таблице Б.1 с разбивкой по месяцам и неделям за период времени дипломирования.

Как видно из календарного план-графика проведения ВКР, выполнение работы проводилось в течение всего времени, которое выделили на выполнение ВКР.

3.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

3.2.5 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле (17):

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi}, \quad (17)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 6.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент.

Основные работы для ВКР проводились за рабочей станцией в корпусе университета и на домашней станции. Время, проведенное за работой: 1280 часов. Мощность рабочих станций: 0,5 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле (18):

$$C = C_{эл} * F_{об} * P = 4 * 0,5 * 1280 = 2560 \text{ руб} \quad (18)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (4 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2560 рублей.

Таблица 6 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Электроэнергия	кВт·ч	640	4	2560
Итого				2560

3.2.6 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

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

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (19)$$

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

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12–20 % от $З_{осн}$).

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

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p = 1294 \cdot 31 = 40121 \text{ руб.},$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{20000 \cdot 11,2}{225} = 1294 \text{ руб.},$$

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. (таблица 7).

Таблица 7 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	109	109
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	31	41
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	225	215

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot k_p = 20000 \cdot 1,3 = 26000 \text{ руб.},$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по КПП, руб.,

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска;

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 8.

Таблица 8 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс},$ руб.	k_p	$Z_m,$ руб.	$Z_{дн},$ руб.	$T_p,$ раб. дн.	$Z_{осн},$ руб.
Руководитель	20000	1,3	26000	1294	31	40121
Студент	2642	-	2642	132	25	3288
Итого						43409

3.2.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

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:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 40121 \cdot 0,12 = 4815 \text{ руб.},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнитель	$k_{доп}$	$Z_{осн}$	$Z_{доп}$
Руководитель	0,12	40121	4815
Итого			4815

3.2.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (20)$$

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

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

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в таблице 10.

$$k_{\text{внеб}} = k_{\text{пф}} + k_{\text{с}} + k_{\text{пн}}, \quad (21)$$

где $k_{\text{пф}}$ – коэф. отчисления в пенсионный фонд;

$k_{\text{с}}$ – коэф. отчисления страховых взносов;

$k_{\text{пн}}$ – коэф. отчисления в подоходный налог.

$$k_{\text{внеб}} = 0,271$$

Таблица 10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Бакалавр
Основная заработная плата, руб.	40121	3288
Дополнительная заработная плата, руб.	4815	–
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Сумма отчислений	12177	–
Итого	12177	

3.2.9 Затраты на научные и производственные командировки

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов. Затраты по данной статье расходов приведены в таблице 12.

3.2.10 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями (контрагентами, субподрядчиками), т.е.:

1) Работы и услуги производственного характера, выполняемые сторонними предприятиями и организациями. К работам и услугам производственного характера относятся:

- выполнение отдельных операций по изготовлению продукции, обработке сырья и материалов;

- проведение испытаний для определения качества сырья и материалов;
- контроль за соблюдением установленных регламентов технологических и производственных процессов;
- ремонт основных производственных средств;
- поверка и аттестация измерительных приборов и оборудования, другие работы (услуги) в области метрологии и прочее.
- транспортные услуги сторонних организаций по перевозкам грузов внутри организации (перемещение сырья, материалов, инструментов, деталей, заготовок, других видов грузов с базисного (центрального) склада в цехи (отделения) и доставка готовой продукции на склады хранения, до станции (порта, пристани) отправления).

2) Работы, выполняемые другими учреждениями, предприятиями и организациями (в т.ч. находящимися на самостоятельном балансе опытными (экспериментальными) предприятиями по контрагентским (соисполнительским) договорам на создание научно-технической продукции, головным (генеральным) исполнителем которых является данная научная организация).

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками. В данной работе затраты по данной статье расходов отсутствуют.

3.2.11 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйственного инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25–35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (22)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов, равный 30+10=40 %.

Где дополнительные 10% учитывают амортизацию.

Накладные расходы составят:

$$C_{\text{накл}} = 0,4 * (44936) = 17974 \text{ руб.}$$

3.2.12 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИИ	2560
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	43409
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	4815
4. Отчисления во внебюджетные фонды	12177
5. Накладные расходы	17974
6. Затраты на научные и производственные командировки	16000
7. Контрагентные расходы	-
Бюджет затрат НИИ	96935

3.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), 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 ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (23)$$

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 представлен в форме таблицы (таблица 12).

Таблица 12 – Оценка характеристик исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,4	5
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5
3. Помехоустойчивость	0,05	4
4. Энергосбережение	0,2	5
5. Надежность	0,2	4
6. Материалоемкость	0,05	5
ИТОГО	1	

$$I_{\text{р-ист}} = 5 * 0,4 + 5 * 0,1 + 4 * 0,05 + 5 * 0,2 + 4 * 0,2 + 5 * 0,05 = 3,95$$

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

4 Социальная ответственность

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Одновременно должно осуществляться последовательное повышение качества и эффективности всех средств коллективной и индивидуальной защиты от вредных и опасных производственных факторов, увеличение объема их производства до полного удовлетворения потребностей народного хозяйства и рациональное их использование.

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 [21].

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 ГОСТ [21], 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

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов [22], которые классифицируются по группам

элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. В таблице 13 приведены основные вредные и опасные факторы производственного процесса.

Таблица 13 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с компьютером, на каф. ПФ		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
		Пожарная опасность	ППБ 01–03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)		Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»

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

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

– психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

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

4.2.1. Организационные мероприятия

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

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая квалификационная группа по технике безопасности с учётом его знаний и опыта работы и выдается специальное удостоверение.

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

4.2.2. Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 37.

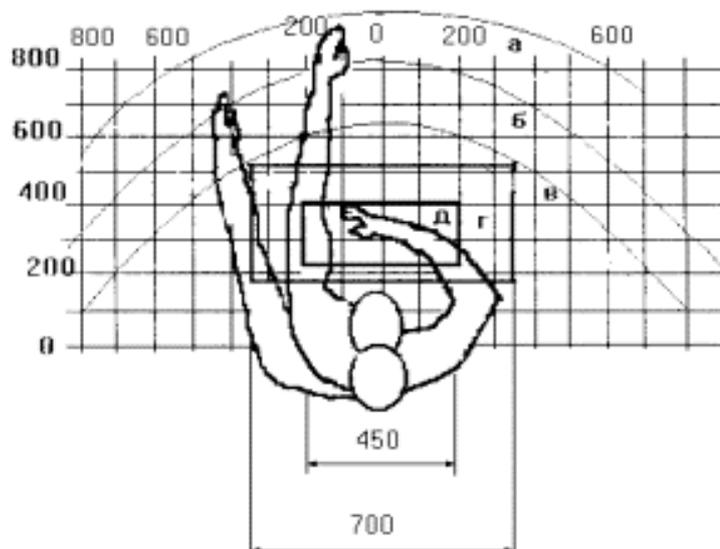


Рисунок 37 – Зоны досягаемости рук

- а – зона максимальной досягаемости рук;
- б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в – зона легкой досягаемости ладони;
- г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

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

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования: высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-

800 мм; высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм.; рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм.; должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.; рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем; монитор 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.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов).

При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.2.3. 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 устанавливаются в соответствии со [21] и приведены в таблице 14.

Таблица 14 – 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

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

более 40 м^3 на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

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

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

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [48] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2кГц — 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц–400кГц — 2,5В/м.
- Плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц–2кГц — 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц–400кГц — 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [21] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более $7,7 \cdot 10$ А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

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

4.3 Электробезопасность

Действие электрического тока на человека носит сложный и разнообразный характер. При замыкании электрической цепи через организм человека ток оказывает термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие.

Термическое действие тока проявляется в виде ожогов как наружных участков тела, так и внутренних органов, в том числе кровеносных сосудов и нервных тканей. Электроожоги излечиваются значительно труднее и медленнее обычных термических, сопровождаются внезапно возникающими кровотечениями, омертвением отдельных участков тела.

Электролитическое действие тока вызывает электролиз крови и лимфатической жидкости, в результате чего нарушается их химический состав и ткани организма в целом.

Биологическое воздействие выражается в раздражении живых тканей организма. Электрический ток нарушает действие биотоков, управляющих внутренним движением ткани, вызывает непроизвольное, противоестественное судорожное сокращение мышц сердца и легких.

Механическое действие тока, на организм является причиной электрических травм. Характерными видами электротравм являются ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, электроофтальмия, разрывы тканей, вывихи суставов и переломы костей.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях [23]:

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

Отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы, вывешивание плакатов, указывающих место работы, заземление корпусов всех установок через нулевой

провод, покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией, недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

4.4 Противопожарная безопасность

Согласно нормам пожарной безопасности, 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 [24]. Так как помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

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

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

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

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

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер [25]. 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);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

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

Список литературы

1. Кулипанов Г.Н. Синхротронное излучение, история и применение, лекция Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения, 2012. [Электронный ресурс]: <http://ssrc.inp.nsk.su/СКР/lections/>
2. M. Minty, Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, Switzerland, Diagnostics, CERN-2005-012 Proceedings of CERN Accelerator School 2003, p. 239
3. Дулов Е.Н., Ивойлов Н.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ: Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета – Казань: Издательство Казанского государственного университета, 2008. – 50с
4. Bassi G., Agoh T., Dohlus M. et al. // NIM A, 2006 — 557, p. 189.
5. Михайлин В. В., Тернов И. М. Синхротронное излучение. — М.: Знание, 1988.— С.64.
6. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.— 672 с.
7. Тернов И. М. Синхротронное излучение. — М.: Успехи физических наук, 1995.— Т. 165, № 4. – С. 429 – 456.
8. Смоляков Н.В. Излучение релятивистских частиц в неоднородном магнитном поле и диагностика пучков ускорителей [Текст]: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.физ.–мат.наук: 01.04.02 / Н. В. Смоляков– М., 1993. – С.14. : ил
9. D. Brandt Organisation Europeenne pour la recherche nucleaire CERN European Organization for nuclear research, CERN–2010–004.
10. T. Tanaka and H. Kitamura SPECTRA - a synchrotron radiation calculation code — J. Synchrotron Radiation, 8, 2001 — 1221.
11. G.A. Naumenko Features of edge effect of coherent synchrotron radiation of relativistic electrons — Advanced Materials Research Vol.1084, 2015 — 234–240.

12. Калинин Б.Н., Науменко Г.А., Потылицын А.П., Саруев Г.А., Сухих Л.Г., Ча В.А. Измерение угловых характеристик переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах. Письма в ЖЭТФ 84 3, 2006. – 136– 140.
13. Z. Nergiz Radiation properties of Turkish light source facility TURKAY. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 795, 2015.— 140–143.
14. Francois Fauth, Roeland Boer, Fernando Gil-Ortiz, Catalin Popescu, Oriol Vallcorba, Inma Peral, Daniel Fulla, Jordi Benach a , and Jordi Juanhuix The crystallography stations at the Alba synchrotron. Eur. Phys. J. Plus, 2015 – 130: 160.
15. Akash Deep Garg , A.K. Karnewar, A. Ojha, B.B. Shrivastava, A.C. Holikatti, T.A. Puntambekar, C.P. Navathe Design of x-ray diagnostic beam line for a synchrotron radiation source and measurement results, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 754, 2014. – 15–23.
16. Jeffrey C. Crosbie and Peter A. W. Rogers Reference dosimetry at the Australian Synchrotron's imaging and medical beamline using free-air ionization chamber measurements and theoretical predictions of air kerma rate and half value layer. Am. Assoc. Phys. Med. 40 (6), 2013. – 062103.
17. Spectra 10.0.7 – [Электронный ресурс]: <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/>
18. T. Tanaka and H. Kitamura, "Recent Progress of the Synchrotron Radiation Calculation Code SPECTRA", Proc. 9th Int. Conf. Synchrotron Rad. Instrum. SRI2006. – 355.
19. Науменко Г.А., Калинин Б.Н., Попов Ю.А., Потылицын А.П., Саруев Г.А., Сухих Л.Г., Ча В.А. Когерентное синхротронное излучение банча релятивистских электронов при его повороте // Известия вузов. Физика, 2007. – т. 50 – № 10/3 – С.194– 198.
20. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие/ И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова,

Л.Р. Тухватулина З.В. Креницына; Томский политехнический университет.
– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С.36.

- 21.ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
22. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 1997 г.
- 23.ГОСТ 12.1.030-81, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
24. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 31 окт. 1995 г.
25. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.

Приложение А

Излучение электронов в вигглере на установке LUCX КЕК

В КЕК (Япония) планируется установка компактного плоского 30 см вигглера [1] с целью исследования генерации электромагнитного излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне на основе заранее сгруппированного электронного пучка. Данная схема генерации ондуляторного излучения (ОИ) является перспективной ввиду своей компактности, т.к. содержит только лазерную систему, электронную пушку и ондулятор (вигглер) [2]. Проведение экспериментов по генерации излучения будет проводиться при участии сотрудников кафедры Прикладной физики ФТИ ТПУ. Для того чтобы оптимизировать характеристики излучения необходимо провести детальное моделирование при различных параметрах вигглера и пучка электронов LUCX

Теория ондуляторного излучения

Одной из разновидностей СИ является ондуляторное излучение. Ондуляторное излучение возникает вследствие ускорения электрона, испытываемого им при движении в периодически знакопеременном магнитном поле (разновидность магнитно-тормозного излучения). Свойства ОИ сильно зависят от величины отклонения угла ψ_0 в сравнении с естественным углом раствора $1/\gamma$ испускаемого излучения. Это отношение определяется параметром ондуляторности $K_u = \gamma\psi_0$

В зависимости от значения K_u , существует два возможных случая.

- Для $K_u < 1$ угол ψ_0 траектории частиц меньше угла раствора $1/\gamma$ испускаемого излучения. В результате, заряд, пересекающий ондулятор излучает плавно модулированное поле, что приводит к, так называемому, слабому ОИ, которое имеет простой спектр и квази-монохроматических свойства.
- Для $K_u > 1$ угол отклонения ψ_0 больше угла раствора $1/\gamma$ излучения. Как следствие, испускаемое поле сильно модулировано, что приводит к сильному ОИ с более сложной структурой и спектром, содержащим много гармоник [2].

Среди разнообразных типов ондуляторов наибольшее распространение получили ондуляторы со знакопеременным магнитным полем. Схематическое изображение такого ондулятора и траектории частицы, движущейся в нем, приведено на рис. А.1.

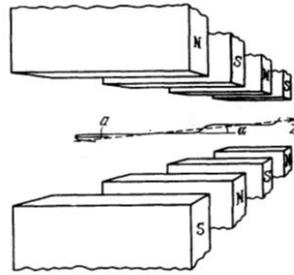


Рисунок А.1. – Принципиальная схема магнитного ондулятора [3]

Ондулятор состоит из двух периодических систем, каждая из которых содержит большое число магнитных полюсов чередующейся полярности. Напряженность поперечного магнитного поля ондулятора изменяется вдоль его оси z по закону, близкому к синусоидальному с периодом λ_0 . Релятивистская частица, входящая в ондулятор под малым углом α к его оси, испытывает действие магнитного поля ондулятора, которое приводит к искривлению первоначальной траектории частицы [3].

Суммарные свойства углового распределения мощности:

- В первых двух строк выше указанного выражения два режима поляризации разделены. π -режим исчезает на $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi / 2$. π -режим распределения электроэнергии пропорционален $\sin^2(2\varphi) = (1 - \cos(4\varphi)) / 2$ и поэтому имеет четыре осевых симметрии.
 - σ -режим поляризации исчезает в двух направлениях $\varphi = 0, \theta = 1/\gamma$ и $\varphi = \pi, \theta = 1/\gamma$. Эти два значения соответствуют $\pm x^*$ -направлений от оси диполя в движущейся системе координат, по которой излучение не испускается.
 - Интересно отметить, что сумма $F_u(\theta, \varphi)$ из двух нормализованных режимов поляризации совпадает с выражением для мгновенного распределения излучения из-за поперечного ускорения. Поскольку максимальный угол, $\psi_0 < 1/\gamma$, траектории в слабом ондулятора меньше угла раствора излучения, это мгновенное распределение может быть соблюдено.

Для релятивистских электронов при малых полях, $K_u \ll 1$, поперечное движение электронов в змейке является нерелятивистским, величиной модуляции продольной скорости электрона при движении в змейке можно пренебречь, параметр K_u можно записать как [4]:

$$K_u = \alpha\gamma = \frac{e\lambda_0 B_0}{2\pi mc}. \quad (1)$$

Электромагнитная волна, излученная электроном при однократном прохождении змейки, приходит в точку наблюдения, находящуюся на оси змейки, в виде цуга всплесков электрического и магнитных полей с периодом

$$T_1 = \frac{\lambda_0}{v_{||}} \approx \frac{\lambda_0}{c}, \quad (2)$$

в следствие искривленности траектории в змейке средняя продольная скорость электронов вдоль оси z

$$v_{||} = v \left(1 - \frac{\alpha^2}{4}\right), \quad (3)$$

отсюда

$$T_1 = \frac{\lambda_0}{v \left(1 - \frac{\alpha^2}{4}\right)} - \frac{\lambda_0}{c} = \frac{\lambda_0}{2\gamma c} \left(1 + \frac{\alpha^2 \gamma^2}{2}\right). \quad (4)$$

Соответственно в точке наблюдения, находящейся на луче, расположенном под некоторым углом θ к оси змейки, источник излучения приближается со скоростью $v_{||} \cos \theta$, регистрируется излучение с длиной волны [5]

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{k^2}{2} + \gamma^2 \theta^2\right). \quad (5)$$

Описание вигглера и электронного пучка ускорителя LUCX

Генерации электромагнитного излучения в ТГц диапазоне осуществляется на основе заранее сгруппированного электронного пучка с расстояниями между сгустками порядка длины самих сгустков. Энергия электронов после электронной пушки равна 8.25 МэВ, а после ускоряющей секции – 30 МэВ. Параметры пучка представлены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Основные параметры пучка

Наименование	Обозначение	Значение
Энергия электрона	E_e	8.25 МэВ
Фундаментальная частота ОИ на оси	ω_{10}	4.14 ТГц
Коэффициент ондуляторности	K_u	2.42
Населённость сгустка	N_e	10^9

Вигглер содержит пять периодов, состоящих из постоянных магнитов, где длина каждого периода равна 60 мм, ширина зазора между полюсами может меняться от 30 до 60 мм, амплитуда магнитного поля 0,432 Т. Схема одного периода вигглера представлена на рис. А.2.

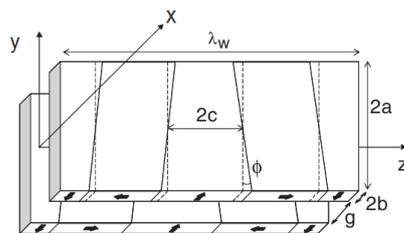


Рисунок А.2 – Схематическое изображение одного периода вигглера [1]

Результаты моделирования ондуляторного излучения

В сильном ондуляторе ($K_u > 1$) угол отклоняется частицы от оси ондулятора не на много больше угла раствора $1/\gamma$, поэтому $\beta \neq 1$ примем $1 - \beta \approx 1/(2\gamma^2)$. Таким образом, мы включаем сюда члены до порядка $(K_u/\beta\gamma)^2$.

Примем

$$\beta^* = \beta \left(1 - \frac{K_u}{4\beta^2\gamma^2} \right), \quad \gamma^* = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^{*2}}}, \quad K_u^* = \frac{K_u}{\sqrt{1 + K_u^2/2}}$$

Предположим, что число периодов ондулятора является достаточно больших, что при данном угле, вклады от различных гармоник разделены по частоте и нет перекрытия между ними. Это позволяет нам рассчитать мощность излучения для каждого гармонического m отдельно и получить полную мощность в виде суммы, $P = \sum P_{um}$. Если количество периодов не было достаточно большим, мы могли получить тот же угол излучения той же частоты, но принадлежащих к разным гармоникам, которые могут производить эффекты интерференции. Мы исключаем такую возможность здесь [6].

$$\frac{d^2 P_m}{d\Omega d\omega} = \frac{2r_p^2 |E_m(\omega)|^2}{\mu_0 L_u}, \quad \frac{d^2 P}{d\Omega d\omega} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{d^2 P_m}{d\Omega d\omega}.$$

Спектрально–угловая плотность мощности для каждого гармонического $m > 0$,

$$\frac{d^2 P_m}{d\Omega d\omega} = \frac{dP_m}{d\Omega} f_N(\Delta\omega_m) = P_u \gamma^{*2} [F_{m\sigma}(\theta, \varphi) + F_{m\pi}(\theta, \varphi)] f_N(\Delta\omega_m), \quad (6)$$

где

$$F_{m\sigma}(\theta, \varphi) = \frac{3m^2}{\pi(1 + K_u^2/2)^2 K_u^{*2}} \frac{(2\Sigma_{m1} \gamma^* \theta \cos\varphi - \Sigma_{m2} K_u^*)^2}{(1 + \gamma^{*2} \theta^2)^3}$$

$$F_{m\pi}(\theta, \varphi) = \frac{3m^2}{\pi(1 + K_u^2/2)^2 K_u^{*2}} \frac{(2\Sigma_{m1} \gamma^* \theta \sin\varphi)^2}{(1 + \gamma^{*2} \theta^2)^3}, \quad (7)$$

где

$$\Sigma_{m1} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(ma_u) J_{m+2l}(mb_u)$$

$$\Sigma_{m2} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(ma_u) (J_{m+2l+1}(mb_u) + J_{m+2l-1}(mb_u)), \quad (8)$$

где

$$a_u = \frac{K_u^2}{4(1 + \gamma^{*2} \theta^2)}, \quad b_u = \frac{2K_u^* \gamma^* \theta \cos\varphi}{1 + \gamma^{*2} \theta^2}. \quad (9)$$

Спектральная функция в $f_N(\Delta\omega_m)$ обобщается на высшие гармоники $\omega_m = m\omega_1$:

$$f_N(\Delta\omega_m) = \frac{N_u}{\omega_1} \left(\frac{\sin\left(\frac{\Delta\omega_m}{\omega_1} \pi N_u\right)}{\frac{\Delta\omega_m}{\omega_1} \pi N_u} \right)^2, \quad \omega_m = m\omega_1 = m \frac{2\gamma^{*2} \Omega_u}{1+\gamma^{*2} \theta^2},$$

$$\frac{\Delta\omega_m}{\omega_1} = \frac{\omega - m\omega_1}{\omega_1}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} f_N(\Delta\omega_m) d\omega = 1. \quad (10)$$

Уравнение углового распределения мощности ОИ имеет вид:

$$\frac{dP_m}{d\Omega} = P_u \gamma^{*2} [F_{m\sigma}(\theta, \varphi) + F_{m\pi}(\theta, \varphi)] =$$

$$P_u \gamma^{*2} \frac{3m^2 [(2\Sigma_{m1} \gamma^* \theta \cos\varphi - \Sigma_{m2} K_u^*)^2 + (2\Sigma_{m1} \gamma^* \theta \sin\varphi)^2]}{\pi(1+K_u^2/2)^2 K_u^{*2} (1+\gamma^{*2} \theta^2)^3}. \quad (11)$$

Ни рис. А.3 представлены угловые распределения мощности ОИ горизонтально поляризованного (рис. А.3.а), вертикально поляризованного (рис. А.3.б) и сумма двух поляризаций (рис. А.3.в).

Угловое распределение мощности ОИ, интегрировано по всему спектру, рассчитано для вышеуказанных параметров в приближении бесконечного ондулятора на расстоянии 1 м от ондулятора в одночастичном приближении с учетом четырёх гармоник.

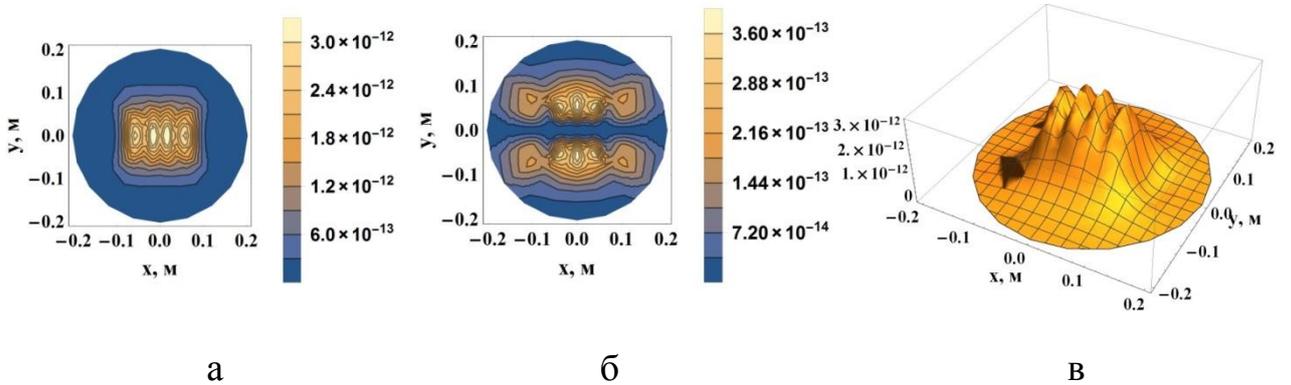


Рисунок А.3 – Угловое распределение мощности (Вт/ср) ОИ горизонтально (а), вертикально (б) поляризованного и сумма двух поляризаций (в)

При данном угле θ излучения от сильного ондулятором имеет спектр, содержащий набор узких полос, сосредоточенных вокруг гармоник с частотой $m\omega_1$. Она задается спектральной функции $f_N(\Delta\omega_m)$ (10), которые мы преобразуем с помощью δ -функции. Её интегрирование дает, при заданном углом θ , набор одночастотных линий $\omega = \omega_m = m\omega_1$. Преобразуем угловую плотность мощности (б) в спектральное распределение [б]:

$$\omega \approx \omega_m = m\omega_1 = \frac{m\omega_{10}}{1+\gamma^{*2} \theta^2} = \frac{2mk_u c\gamma^{*2}}{1+\gamma^{*2} \theta^2},$$

$$d\omega_m = -\frac{2m\omega_{10}\gamma^{*2}}{(1+\gamma^{*2}\theta^2)^2} \theta d\theta = -2m\omega_{10}\gamma^{*2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_{10}}\right)^2 \theta d\theta, \quad (12)$$

$$\frac{dP}{d\omega_m} = \frac{1+K_u^2/2}{2m\omega_{10}\gamma^2} \left(\frac{\omega_{01}}{\omega_1}\right)^2 \int_0^{2\pi} \frac{dP_m}{d\Omega} d\varphi.$$

Интегрирование по φ должна осуществляться численно. Нечетные гармоники имеют острые пики на высоких частотах, потому что их угловые распределения сосредоточены вокруг малых углов, где $\omega \approx m\omega_{10}$. Четные гармоники не имеют интенсивность на оси, где высокая частота излучения. По этой причине их спектры исчезают в верхней части.

На рис. А.4 представлены спектры мощности ОИ двух поляризаций четырёх гармоник. Спектры ОИ, интегрированы по всем углам, рассчитаны для вышеуказанных параметров в приближении бесконечного ондулятора в одночастичном приближении с учетом четырёх гармоник.

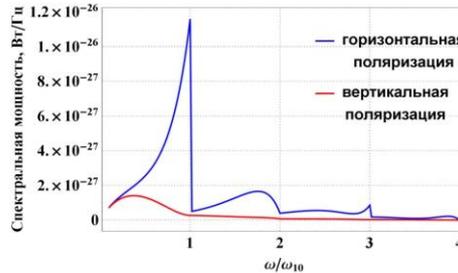


Рисунок А.4 – Спектры ОИ горизонтально и вертикально поляризованного

На рис. А.5 представлены спектры мощности ОИ горизонтально и вертикально поляризованного. Спектры ОИ, интегрированы по всем углам, рассчитаны для вышеуказанных параметров для короткого ондулятора в одночастичном приближении для первой гармоники.

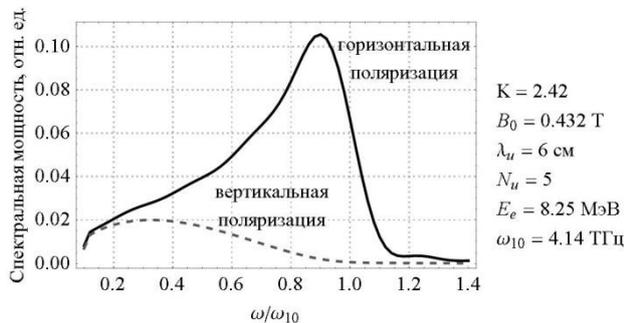


Рисунок А.5 – Спектры мощности ОИ горизонтально и вертикально поляризованного для короткого ондулятора с учетом первой гармоники.

Из углового распределения мощности ОИ, интегрировано по всему спектру, рассчитано для вышеуказанных параметров в приближении

бесконечного ондулятора на расстоянии 1 м от ондулятора в одночастичном приближении с учетом четырёх гармоник, можно сделать вывод, что максимальная мощность ОИ сосредоточена в пределах от – 8 до 8 см по горизонтали и от – 4 до 4 см по вертикали. А также, что мощность горизонтально поляризованного ОИ в 10 раз выше вертикально поляризованного [7].

Из спектров ОИ, интегрированных по всем углам, рассчитанных для вышеуказанных параметров в приближении бесконечного ондулятора в одночастичном приближении с учетом четырёх гармоник, можно сделать вывод, что в ТГц часть спектра излучения основной вклад вносит 1ая гармоника горизонтально поляризованного ОИ.

В одночасачном приближении для короткого ондулятора для 1ой гармоники диапазоном частот на ширине на полувысоте лежит в пределах от 2.69 до 6.21 ТГц.

Список литературы

1. Kashiwagi S., et al. Rigorous evaluation of the edge-focusing wiggler based on the magnetic field measurement // PRST AB. – 2009. – V.12. – P. 120703.
2. Кулипанов Г.Н. Изобретение В.Л. Гинзбургом ондуляторов и их роль в современных источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах: Устный выпуск журнала «Успехи физических наук», Новосибирск, 2007 — УФН 177 —384.
3. Генкин Г.М., Зильберберг В.В. Ондуляторное излучение релятивистских электронов в магнитном ферромагнетике –М: Журнал «Письма в ЖЭТФ», т. 36, вып. 9, 1982. – С. 334–336.
4. Никитин М.М., Эпп В.Я. Ондуляторное излучение, М: Энергоатомиздат, 1988.– С. 152.
5. Потылицын А.П., Рязанов М.И., Стриханов М.Н., Тищенко А.А. Дифракционное излучение релятивистских частиц: учебное пособие, ТПУ, 2008. – С. 349.
6. Hofmann A. The Physics of Synchrotron Radiation. – New York: Cambridge University Press, 2004. – 323
7. Харисова А.Е., Сутыгина Я.Н., Шкитов Д.А. Моделирование характеристик ондуляторного излучения для параметров ускорителя LUCX@КЕК. Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции. – Томск, 2015. – С. 340.

Приложение Б

Таблица Б.1 – Календарный план-график проведения ВКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				март				апрель				май				июнь			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Составление и утверждение технического задания	Р	3																
2	Выбор направления исследований проводимых в рамках ВКР	С, Р	3																
3	Подбор и изучение материалов по теме	С	10																

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				март				апрель				май				июнь			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
4	Календарное планирование работ по теме	Р	5																
5	Проведение моделирования и обоснований	С	10																
6	Оценка правильности полученных результатов	С, Р	5							 									
7	Определение целесообразности проведения ВКР	Р	3																

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				март				апрель				май				июнь			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
8	Выбор параметров молиорвания	С	20																
9	Моделирование	С	40																
10	Оценка эффективности и применения результатов исследования	С, Р	7																
11	Составление пояснительной записки	С	5																

