



Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Теоретическое и экспериментальное исследование магнитной подсистемы планарного магнетрона

УДК 621.793.7:621.385.64

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А95	Зайцев Даниил Дмитриевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Евдокимов К. Е.	к.ф.-м.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.экон.наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Селиваникова О. В.			

Компетенции выпускников ООП «Ядерные физика и технологии» по направлению 14.03.02
Ядерные физика и технологии,
специализация «Пучковые и плазменные технологии»
(2019 года приёма)

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ПК(У)-1	Готов принимать участие в теоретических исследованиях в различных областях физики, связанных с современными высокотехнологическими способами энергетического воздействия на материалы, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых процессов
ПК(У)-2	Способен участвовать в экспериментальных исследованиях в различных областях физики, связанных с воздействием плазмы и пучков заряженных частиц на вещество, самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий.

Код компетенции	Наименование компетенции
ПК(У)-3	Способен осуществлять самостоятельный поиск, изучение и использование научно-технической информации по тематике исследования, применять современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-4	Способен проектировать плазменно-пучковые технологические процессы и оборудование для применения в научных исследованиях и промышленности
ПК(У)-5	Готов к участию в производственно-технологической деятельности, связанной с применением плазменных и пучковых технологий для обработки материалов и синтеза новых материалов (в том числе нанесению функциональных покрытий), определению основных параметров технологических процессов, анализу физических и механических свойств изделий и материалов.
ПК(У)-6	Способен применять современные цифровые технологии и пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов.
ПК(У)-7	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования.



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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ 03.10.2022 г. Селиваникова О.В.

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
0A95	Зайцев Даниил Дмитриевич

Тема работы:

Теоретическое и экспериментальное исследование магнитной подсистемы планарного магнетрона	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№34-109/с от 03.02.2023 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2023 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является магнитное поле магнетрона. Исходные данные: математический пакет Wolfram Mathematica, пакет численного моделирования Elcut.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ литературных источников по теме численное моделирование магнитного поля системы, включающей материалы с нелинейными характеристиками; постановка задачи исследования; создание и верификация модели; раздел «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность».</p>
--	---

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист. 2. Актуальность работы. 3. Цель и задачи работы. 4. Описание подхода моделирования магнитного поля. 5. Создание расчетного модуля. 6. Верификация математической модели. 7. Экспериментальные данные. 8. Влияние разных факторов на магнитное поле системы. 9. Заключение. 10. Список использованной литературы.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов М.А., д.экон.наук, профессор отделения социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	Передерин Ю.В., к.т.н., доцент отделения ядерно-топливного цикла

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	03.10.2022 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Евдокимов К. Е.	д.ф.-м.н.		03.10.2022 г.

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А95	Зайцев Даниил Дмитриевич		03.10.2022 г.

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

Обучающемуся:

Группа	ФИО
0А95	Зайцев Даниил Дмитриевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>– районный коэффициент- 1,3; – коэффициент дополнительной заработной платы -1,15; – накладные расходы – 16%</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ потенциальных потребителей результатов исследования. Исследование конкурентных технических решений. Проведение SWOT-анализа</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения научного исследования. Формирование бюджета затрат научноисследовательского проекта</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Оценка сравнительной эффективности проекта</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2023 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.экон.наук		13.03.2023 г.

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А95	Зайцев Даниил Дмитриевич		13.03.2023 г.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Обучающемуся:

Группа	ФИО
0А95	Зайцев Даниил Дмитриевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)
<p>2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p>ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ ГОСТ 12.1.019-2017 ГОСТ 22.0.01-94</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).
<p>2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

3. Охрана окружающей среды:	<ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); <p>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</p>
4. Защита в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2023 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	К.Т.Н		13.03.2023 г.

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А95	Зайцев Даниил Дмитриевич		13.03.2023 г.

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 111 страниц, 31 рисунков, 23 таблиц, 48 источников.

Ключевые слова: численное моделирование, магнитное поле, магнетронные распылительные системы, магнетроны, модель, измерение магнитного поля.

Объектом исследования является магнитное поле магнетрона.

Цель работы – создание и проверка физико-математической модели для описания поведения магнитного поля магнитной подсистемы планарного магнетрона.

В процессе исследования проводилось моделирование магнитной подсистемы планарного магнетрона. Исследовались методы описания магнитного поля и факторы, влияющие на него.

В результате была создана и верифицирована модель расчета магнитного поля системы с материалами, имеющими нелинейные магнитные характеристики.

Содержание

Введение.....	12
1 Литературный обзор	15
1.1 Магнетронные распылительные системы	15
1.2 Магнитное поле	17
1.3 Метод конечных элементов	22
1.3 Пакеты	27
2 Модель магнитного поля планарного магнетрона.....	30
2.1 Проверка математической модели магнитного поля.....	30
2.1.1 Математическая модель кольца с током.....	30
2.1.2 Математическая модель соленоида конечной длины.....	32
2.1.3 Математическая модель соленоида с сердечником.....	34
2.2 Создание модели магнитного поля планарного магнетрона	35
2.3 Модель симметричного магнетрона.....	40
2.4 Модель “кусочного” магнетрона	42
3 Результаты исследований и анализ	47
3.1 Экспериментальная часть.....	47
3.1.1 Симметричный магнетрон.....	48
3.2 Результаты моделирования в Wolfram Mathematica и Elcut	52
3.3 Сравнение экспериментальных данных и численных решений для магнитных полей магнетронов	52
3.3.1 Сравнение для симметричного магнетрона.....	52
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	60
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	61
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	61
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	63
4.1.3 Технология QuaD.....	65
4.1.4 SWOT-анализ	68
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	71
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	71
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	73

4.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	73
4.3	Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	78
4.3.1	Расчет материальных затрат НТИ	78
4.3.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.....	78
4.3.3	Основная заработная плата исполнителей темы.....	80
4.3.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	82
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	82
4.3.6	Накладные расходы.....	82
4.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта..	83
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	84
5	Социальная ответственность	89
5.1	Анализ вредных и опасных производственных факторов	89
5.1.1	Микроклимат	91
5.1.2	Повышенный уровень шума.....	94
5.1.3	Физические и нервно-психологические перегрузки.....	94
5.1.4	Электромагнитное излучение	97
5.1.5	Освещенность	98
5.1.6	Электробезопасность	100
5.1.7	Пожаровзрывобезопасность	100
5.2	Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС).....	101
	Заключение	105
	Список используемой литературы	107

Введение

В настоящее время один из способов изменения функциональных свойства материалов – это нанесение тонкопленочных покрытий. Данная технология очень востребована во многих отраслях: оптика, электроника, машиностроение, ядерные технологии и т.д.

Для нанесения тонкопленочных покрытий существует множество методов, основанных на различных физических процессах, а также в разных средах. Выбор того или иного метода осаждения обусловлен необходимыми параметрами покрытий, а также скоростью нанесения модифицирующих покрытий. Среди разных способов наибольшее распространение получило магнетронное осаждение, в основе которого лежит использование тлеющего разряда в постоянном магнитном поле. Один из наиболее важных элементов данного метода, это магнитная система. Она позволяет локализовать плазму у поверхности распыляемого материала (мишени) и тем самым увеличивает скорость ионного распыления, а также снижает рабочее давление газового разряда. На сегодняшний день уже разработаны и успешно внедрены в промышленность технологии формирования покрытий с помощью плазмы магнетронных распылительных систем (МРС).

Несмотря на все положительные стороны данного метода, имеются ряд сложностей в его использовании и оптимизации. Одной из них является проблема прогнозирования полученных результатов: для оценки полученных результатов необходимо проведение эксперимента на установке, который, в свою очередь, требует времени и ресурсов. Для получения и исследования требуемых свойств материалов используется множество параметров работы установки: давление, напряженности электрического и магнитного полей, мощность источника питания катода и т.д. Помимо этого, изменяются параметры осаждения: материалы образцов и осаждаемых покрытий, толщина покрытий, морфология, газовая среда и т.д.

Одна из составляющих системы, которая изменяется не так часто после конструирования МРС, это магнитное поле. В связи с этим, необходимо подобрать оптимальные параметры магнитной системы для эффективной эксплуатации. Значимым параметром МРС является максимальное значение составляющей магнитного поля B_r , параллельной поверхности мишени (катода).

Расчет аналитическими методами поведение магнитного поля в МРС затруднителен, ввиду наличия материалов с нелинейными магнитными характеристиками. Для решения данной проблемы используются численное моделирование системы.

Моделирование может позволить сократить не только количество экспериментов на установке, но и ускорить поиск оптимальных параметров работы системы. Помимо этого, оно может помочь в масштабировании МРС для промышленных предприятий. Кроме того, основываясь на созданной модели можно будет конструировать новые магнетронные системы с оптимальными магнитными характеристиками.

Объект: магнитное поле магнетрона.

Предмет: численные методы описания магнитного поля.

Проблема: большая длительность эксперимента; высокая дороговизна и отсутствие доступа к используемому математическому представлению решений дифференциальных уравнений, а также к допущениям в готовых пакетах.

Цель работы: создание и проверка физико-математической модели для описания поведения магнитного поля магнитной подсистемы планарного магнетрона.

Задачи работы:

- Выбор и изучение пакетов моделирования магнитного поля;
- Проверка математической модели магнитного поля в цилиндрической системе координат на ряде физических задач, имеющих известные аналитические решения;
- Создание математической модели магнитного поля магнетронов;
- Сравнение численных решений с готовым пакетом Elcut ;

- Проверка созданной модели на адекватность - проведение экспериментов для измерения магнитного поля МРС.

1 Литературный обзор

1.1 Магнетронные распылительные системы

Как отмечалось ранее, магнетронные распылительные системы имеют широкое применение в современных технологиях. Принципиальная схема планарного магнетрона представлена на рисунке 1.

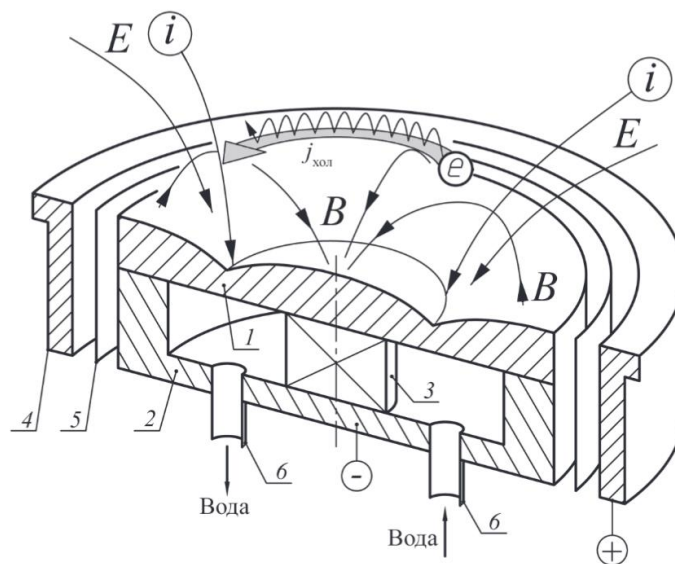


Рисунок 1 – Магнетронный диод: 1 – катод, 2 – магнитопровод, 3 – магнит, 4 – анод, 5 – электростатический экран, 6 – штуцера для подачи воды [1]

Главное применение магнетронов – это создание и поддержание газового разряда, локализованного около поверхности мишени за счет скрещенных магнитных и электрических полей при подаче разности потенциалов 0,4–1 кВ. При выполнении скрещенности полей наибольшее влияние на движение электрона оказывает магнитное поле. Электроны движутся по циклоиде вдоль силовых магнитного поля, претерпевая множество столкновений с атомами рабочего газа до тех пор, пока посредством диффузии не окажутся на аноде. В случае ионов можно пренебречь их взаимодействием с магнитным полем между двумя столкновениями, ввиду большого значения ларморовского радиуса, который во много раз больше размеров самого магнетрона. Следовательно, траектория ионов не искривляется, и они движутся вдоль силовых линий электрического поля в сторону катода.

Таким образом, в газоразрядном промежутке стремительно изменяются как индукция магнитное поле \vec{B} (0,3 ... 0,0001 Тл), так и напряженность электрического поля \vec{E} ($10^3 \dots 10^6 \frac{В}{м}$) – в связи с этим выделяют три характерные области, представленные на рисунке 2.

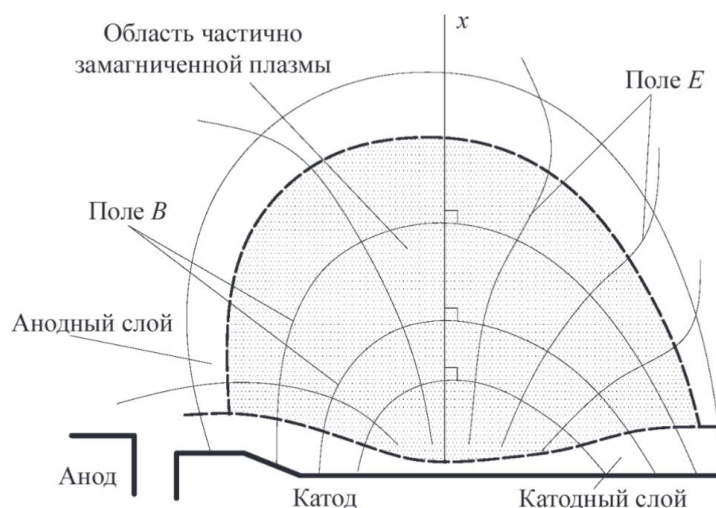


Рисунок 2 – Схема расположения областей разряда в магнетронной распылительной системе [1]

Катодный слой находится непосредственно вблизи мишени, в этом промежутке напряжённость электрического поля (E) снижается на 80–90%. Здесь ток разряда переносится ионами, они получают бóльшую часть своей кинетической энергии. Процессом ионизации в этой области можно пренебречь.

Область частично замагниченной плазмы располагается между катодным и анодным слоями. Ионизация атомов рабочего газа происходит преимущественно в этом промежутке, а напряжённость электрического поля здесь мала. В анодном слое ток разряда обеспечивается электронами, он не влияет на параметры разряда.

Одним из наиболее важных элементов магнетронных распылительных систем является магнитное поле. При использовании магнитопровода и постоянного магнита создается магнитное поле около поверхности катода, по форме напоминающее арку. В настоящее время применяют магнетроны,

состоящие из системы постоянных магнитов для увеличения параллельной составляющей магнитной индукции.

Арочное магнитное поле над поверхностью катода образует «ловушку» для электронов, тем самым существенно удлиняя траекторию их движения и локализуя процесс ионизации атомов рабочего газа у поверхности мишени. Это позволяет поддерживать газовый разряд при относительно низком рабочем давлении (0,1–1 Па) и обеспечивать его высокую плотность мощности [2].

Вследствие выше перечисленного можно заключить, что важно знать параметры магнитного поля магнетронных распылительных систем. Для этого можно использовать магнитометр. Однако, для этого требуется большое время, а проведения таких работ невозможно для каждого магнетрона. Помимо этого, одной из проблем является отсутствие возможности измерения вектора магнитной индукции \vec{B} у поверхности магнетрона из-за габаритов самого зонда. Поэтому необходимо использовать методы численного моделирования для расчетов характеристик магнетронных распылительных систем.

1.2 Магнитное поле

В настоящее время использование магнитных систем можно наблюдать во многих отраслях науки и жизни: начиная с магнитной обработки нефти и заканчивая фокусирующими электромагнитами в ускорителях. Ввиду такого вседусущего применения магнитного поля появляется необходимость в расчетах физических параметров магнитных систем. Аналитически возможно решить небольшое количество физических задач, некоторые из которых будут рассмотрены позже.

Исторически рассмотрение возникновения магнитного поля в веществе связывают с циркуляцией замкнутых токов, основные носители которых являются молекулы вещества с собственным магнитным моментом. При отсутствии внешнего поля в не ферромагнитных материалах ориентации таких токов хаотична и индуцированные поля взаимно компенсируются. Под действием

магнитного поля извне магнитные моменты молекул стремятся сориентироваться вдоль силовых линий внешнего поля. Следовательно, полный магнитный момент вещества становится отличным от нуля, тем самым образец намагничивается и в нем возникает собственное магнитное поле с напряженностью \vec{B} .

По современным представлениям, источниками магнетизма в веществе являются: спиновое и орбитальное движение электронов вокруг атомных ядер, а также собственное вращение атомных ядер. Атомные ядра ввиду их массивности движутся медленнее, чем электроны, поэтому магнитные моменты электронов на несколько порядков больше атомных ядер.

Для описания магнитного поля используются микроскопические и макроскопические поля. Микроскопическое поле есть истинное поле, возбуждаемое движущимися элементарными зарядами вещества. Оно резко меняется на расстояниях атомного масштаба. Макроскопическое поле в веществе получается путем “сглаживания” микрополей, т.е. их усреднения по физически бесконечно малым объемам. [3]

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{макро}} = \langle \vec{B}_{\text{микро}} \rangle = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \vec{B}_{\text{микро}} dV. \quad (1)$$

Таким образом, можно представить эквивалентные токи, циркулирующие в атомах вещества, в виде орбитального и спинового движения атомных ядер и электронов. Для таких токов было дано общее название – молекулярные токи. В частности, используем выше описанный метод для перехода к макроскопическим полям, т.е. сглаживаем молекулярные токи и получаем макроскопические токи для вычисления поля \vec{B} .

Такие токи получили название токов намагничивания I_m . Помимо этого, существуют обычные токи, которые текут по проводам, отвечающие за перемещение носителей заряда (“дырок” или электронов). Такие токи называются токами проводимости I . На основе этого можно считать, что поле \vec{B}

в образце возбуждается как токами намагничивания (с плотность тока j_m), так и токами проводимости (j). Перейдем к теореме и циркуляции:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_k I_k = \left| I = \iint_S (\vec{j} + \vec{j}_m) d\vec{S} \right| = \mu_0 \iint_S (\vec{j} + \vec{j}_m) d\vec{S}. \quad (2)$$

Или в дифференциальной форме

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 (\vec{j} + \vec{j}_m), \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Для описания магнитного поля в магнитостатике удобно ввести магнитный векторный потенциал \vec{A} [Тл · м], по аналогии с электростатикой:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}. \quad (4)$$

Или

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}. \quad (5)$$

В итоге, получаем уравнение Пуассона для теоремы о циркуляции магнитного поля с использованием векторного магнитного потенциала \vec{A} :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{j}. \quad (6)$$

Математическая модель магнитного поля представляет собой решение трехмерного уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала. Однако, решение такого рода задачи пусть и возможно, но очень сильно ограничивает скорость и сходимость численных вычислений, поэтому задачу необходимо свести к двумерному случаю. Помимо этого, магнетроны обладают цилиндрической симметрией в той или иной мере. Отсюда следует, что все математические операторы необходимо задавать и решать в цилиндрической системе координат (ЦСК).

В рассматриваемых задачах вектор индукции \vec{B} всегда лежит в плоскости модели (rz), а вектор плотности стороннего тока j и векторный потенциал A перпендикулярны к ней. Отличны от нуля только компоненты j_θ и A_θ в осесимметричных задачах:

$$\vec{j} \perp(rz) \Rightarrow (0, j_\theta, 0), \quad \mu_\theta = \text{const}, \quad A_z = A_r = \text{const}. \quad (7)$$

С использованием уравнений (6) и (7) получаем уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) &= \nabla \times \begin{pmatrix} -\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \\ 0 \\ \frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ j_\theta \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

При условии однородности по углу θ получаем из уравнения (8):

$$\left(\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) \right)_\theta = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right) = j_\theta. \quad (9)$$

Плотность тока-проводимости в уравнении (9) нормирована на значение остаточной намагниченности постоянного магнита:

$$j_\theta = \frac{B_{\text{ост}}}{\mu_0 \cdot \delta}, \quad (10)$$

где j_θ – плотность тока-проводимости $\left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right]$, $B_{\text{ост}}$ – остаточная магнитная индукция постоянного магнита [Тл], δ – толщина слоя тока-проводимости [м].

Помимо этого, моделирования постоянных магнитов основано на модели эквивалентного соленоида: магнит заменяется на соленоид с магнитной проницаемостью сердечника равной магнитной постоянной. Магнитное поле создается за счет протекания поверхностных токов в тонком слое тока-проводимости. Плотность тока в этом промежутке нормирована на значение остаточной намагниченности постоянного магнита. Наиболее наглядно этот переход представлен на рисунке 3.

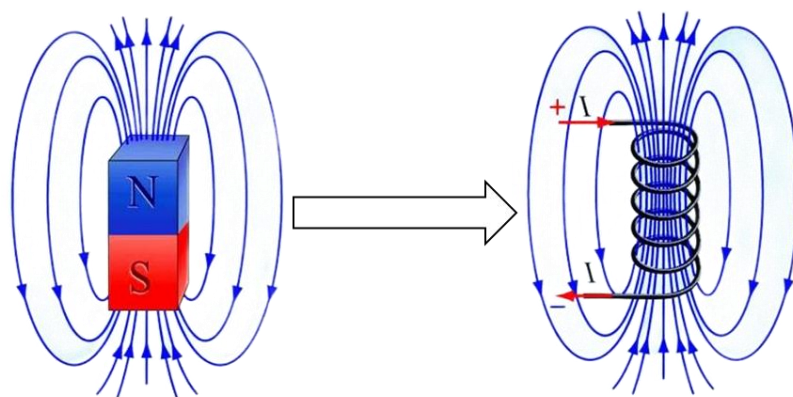


Рисунок 3 – Модель представление постоянного магнита

Использование такого допущения для моделирования магнитного поля обусловлена наличием узкой петли гистерезиса у постоянных магнитов – при относительно сильном внешнем магнитном поле магнитная проницаемость магнита стремится к 1 относительно магнитной постоянной. Качественная зависимость магнитной проницаемости представлена на рисунке 4.

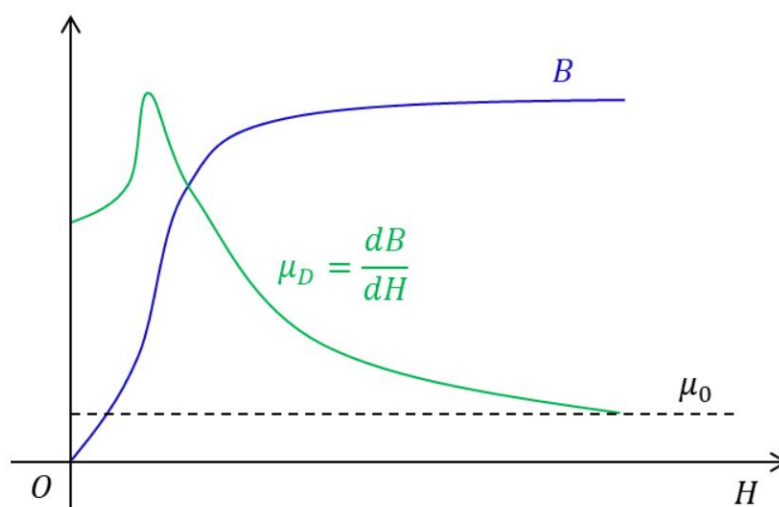


Рисунок 4 – Кривая намагничивания постоянного магнита [4]

Данное допущение сильно упростит решение задачи, так как кривые намагничивания существуют не для всех марок магнитов в общем доступе. Вместе с тем, такой подход позволит ускорить время вычислений численной модели. Для количественного исследования необходимо использовать специальный измерительный прибор (например, миллитесламетр), а также катушку намагничивания, внутри которой будет происходить намагничивание образца с последующим измерением его магнитных свойств – это требует

достаточно много времени. Помимо этого, в случае численного моделирования наличие нелинейной зависимости для магнитной проницаемости магнита усложняет решение задачи, потому что система будет состоять из нескольких граничащих областей, параметры (характеристики) которых зависят от внешнего магнитного поля.

1.3 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой численный метод приближенного решения краевых (граничных) задач, имеющих место в технике и математической физике. В простейшей постановке краевая задача является математической задачей, в которой одна или несколько зависимых переменных должны удовлетворять дифференциальному уравнению (ДУ) в известной области независимых переменных, и удовлетворять определенным условиям, заданным на границах этой области [5]. Метод конечных элементов является логическим/техническим продолжением классических методов таких, как проекционные метод Галеркина и вариационный метод Ритца. Основным отличием от них проявляется в методе аппроксимации искомой физической величины с помощью комбинации непрерывных кусочно-гладких финитных функций. Финитные функции отличны от нуля только в заданном интервале. В МКЭ под такими интервалами подразумеваются конечные элементы, на которые разбивается объект исследований. Для рассмотрения данной тематики использовались описания и результаты, представленные в литературе [6-8].

Краевые задачи также можно рассматривать как задачи в рамках теории поля. Полем является исследуемая область. Полевые переменные рассматриваются как зависимые переменные, которые определяются ДУ. Для выделения из большого многообразия возможных решений одно единственное необходимо использовать граничные условия. В таком случае на границе поля задается определенное значение полевой переменной. В разных физических задачах переменными могут быть выражены как температура, концентрация, магнитный потенциал и т.д.

Рассмотрим общую методику численного решения методом конечных элементов на примере иллюстраций на рисунке 5. На рисунке 5а изображена область исследуемого объекта с определенными физическими характеристиками – это и будет полем для краевой задачи. Для наглядности рассмотрим двумерную модель с одной переменной $u(x, y)$ в точке $P(x, y)$ такой, что определяющее уравнение (или уравнения) точно имеет в ней решение.

Нужно подчеркнуть, что такая постановка задача предполагает наличие точного математического решения в виде аналитического выражения. Вместе с тем зачастую рассматриваются объекты как со сложной геометрией, так и с неоднородными физическими свойствами материалов. Связи с чем получение аналитического решения практически невозможно. Как раз для таких задач используется вычислительные методы для поиска приближенных решений.

На рисунке 5б показан треугольный элемент, заключающий в себе конечномерную подобласть рассматриваемой области.

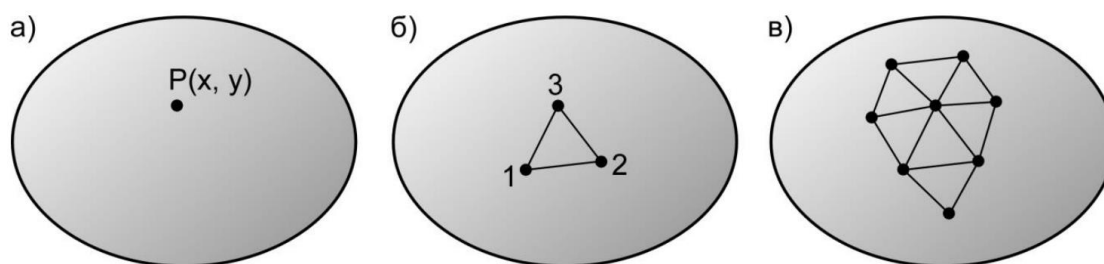


Рисунок 5 – Область решаемой краевой задачи [6]

Поскольку этот элемент не является дифференциалом площади размером $dx \times dy$, постольку он является конечным элементом (КЭ). Каждая вершина элемента является узлом с определенным номером (будет нумеровать против часовой стрелки для удобства). Узлы важная составляющего как для описания геометрии треугольного элемента, так и самого метода – именно в них определяются значения полевой переменной. В зависимости от положения их разделяют на внешние – располагаются на границах элементов и через происходит соединение с другими КЭ (рис. 5в), внутренние – используется для более точного описания системы.

Перейдем к описанию реализации самого метода на примере элемента, представленного на рисунке 5б. Если полевая переменная определяется только в узлах, то как считать во внутренней области элемента? Как раз на этот случай и применяют элементы простой формы (треугольники, четырехугольники и т.д.), чтобы было легче аппроксимировать неизвестную величину внутри области с использованием интерполяции вычисленных ранее узловых значений. Для треугольного элемента, у которого в каждой вершине находится узел с координатами (x_n, y_n) , можно интерполировать переменную поля $u(x, y)$ на элементе линейной зависимостью:

$$u^e(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y, \quad (11)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – неизвестные числовые коэффициенты.

В МКЭ значение полевых переменных в узлах элемента выступают в роли неизвестных констант, которые определяются в ДУ. В свою очередь, интерполяционные функции представляются независимыми переменными в виде полиномов. Они вводятся таким образом, чтобы приближенные решения стремились к точным в узлах сетки:

$$\begin{cases} u_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_1 + \alpha_3 \cdot y_1 \\ u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_2 + \alpha_3 \cdot y_2 \\ u_3 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_3 + \alpha_3 \cdot y_3 \end{cases} \quad (12)$$

Решим эту систему относительно α_n и подставим в (11). Также будем считать, что площадь треугольника равна A , тогда получим:

$$\begin{aligned} u^e = \frac{1}{2A} \cdot [& u_1(x_2y_3 - x_3y_2 + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y) + \\ & + u_2(x_3y_1 - x_1y_3 + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y) + \\ & + u_3(x_1y_2 - x_2y_1 + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y)] \end{aligned} \quad (13)$$

Представленные зависимости определяют аппроксимирующее решение для скалярной величины u^e в рассматриваемом элементе. Тогда приближенное решение можно представить в виде:

$$u^e = N_1 \cdot u_1 + N_2 \cdot u_2 + N_3 \cdot u_3, \quad (14)$$

где N_n – базисные функции (функции формы).

Тогда их можно записать в следующем образом:

$$N_n = \frac{1}{2A}(a_n + b_n x + c_n y)$$

$$\begin{cases} a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2 \\ b_1 = y_2 - y_3 \\ c_1 = x_3 - x_2 \end{cases} \begin{cases} a_2 = x_3 y_1 - y_3 x_1 \\ b_2 = y_3 - y_1 \\ c_2 = x_1 - x_3 \end{cases} \begin{cases} a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1 \\ b_3 = y_1 - y_2 \\ c_3 = x_2 - x_1 \end{cases} \quad (15)$$

Также они должны удовлетворять важному условию: функции формы $N_n = 1$ только для узла с координатами (x_n, y_n) , а в остальных случаях нуль.

Рассмотренный треугольный элемент обладает тремя степенями свободы. В разных задачах их значение может изменяться: для скалярных величин оно равно числу узлов в КЭ, а для векторных величин будет зависеть от числа значений (проекций) помноженное на количество узлов в отдельно взятом элементе.

При построении сетки (множества КЭ) элементы соединяются строго через узлы, тем самым связывая систему как геометрически, так и системой уравнений – зависимость полевой функции в узле одинакова для всех КЭ, соединяемых в нем. Как раз этим допущением мы добиваемся непрерывности неизвестной функции.

Процесс конечно-элементного анализа включает определенную последовательность шагов. Перечислим эти шаги.

1. Дискретизация области: построение сетки, задание свойств (материала) элементов. Область, на которой решается задача, аппроксимируется (покрывается) непересекающимися подобластями простого типа, которые называются конечными элементами. Кроме того, необходимо задать свойства материала, из которого изготовлена конструкция или КЭ. Например, для изотропных тел при решении задач теории упругости необходимо знать такие константы, как модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала, при решении задачи теплопроводности — коэффициент теплопроводности.

2. Выбор аппроксимирующих (базисных) функций. Чаще всего базисные функции выбираются в виде полиномов. Поэтому пространство, на котором ищется решение, является пространством кусочно-полиномиальных функций.

Базисные функции могут иметь различный порядок: линейный, квадратичный, кубический и т.д.

3. Формирование системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с учетом вкладов от элементов и узлов, введение граничных условий в систему уравнений. Например, если задача решается с помощью метода Галеркина (метода взвешенных невязок) формируются интегралы от произведения невязки на весовые функции, которые затем приравниваются к нулю. Если решается задача в вариационной постановке с помощью метода Ритца минимизации функционала, то СЛАУ получается после приравнивания к нулю производных функционала. Интегралы по области разбиваются на интегралы по элементам вычисляются элементные матрицы и элементные векторы, из которых формируются глобальная матрица и вектор правых частей системы.

4. Решение системы уравнений.

5. Определение расчетных величин в элементах. Этими величинами обычно являются производные от неизвестной функции (например, деформации, напряжения, тепловые потоки, скорости).

Точное решение дифференциального уравнения при подстановке в это дифференциальное уравнение обращает его в тождество в каждой точке. Решение МКЭ предполагает, что приближенное решение \bar{u} будет удовлетворять дифференциальному уравнению в узлах сетки $\bar{u}(x_i) = u(x_i) = u_i$.

1.3 Пакеты

Численное моделирование приобрело широкое применение для решения специализированных прикладных и инженерных задач, а также использование в научных исследованиях. В настоящее время существует множество расчетных комплексов. Однако, спектр решаемых задач, а также используемые допущения и возможности пакетов отличаются. Выбор того или иного пакета моделирования зависит прежде всего от задачи и условий (допущений) моделирования, в том числе и финансовые возможности. Далее будут рассмотрены лишь некоторые из них.

а) COMSOL Multiphysics – это многопрофильное программное обеспечение для моделирования, которое специализируется на моделировании и решении дифференциальных уравнений в частных производных. Он имеет удобный интерфейс, что делает его более простым в использовании, чем некоторые другие программы, использующие МКЭ, особенно для тех, кто плохо знаком с моделированием. Программное обеспечение также имеет широкий спектр модулей, которые можно добавить к базовому пакету, позволяя пользователям моделировать различные физические явления, включая теплопередачу, гидродинамику и электромагнетизм и многое другое. Графический пользовательский интерфейс COMSOL упрощает создание моделей, задание граничных условий и визуализацию результатов. Тем не менее, данная программа не лишена недостатков. Одним из них является колебания сходимости результатов моделирования при повторном расчете системы при неизменных условиях. Особенно часто это имеет место быть, если начальные данные были заданы с большой погрешностью.

б) ANSYS Multiphysics – это комплексный программный пакет, включающий инструменты моделирования для широкого круга инженерных дисциплин, включая механический, электрический, жидкостный и тепловой анализ. Он имеет большое сообщество пользователей и широкий спектр учебных пособий и онлайн-ресурсов. ANSYS имеет мощный инструмент предварительной

обработки, который позволяет легко создавать сетки сложной геометрии, а его возможности постобработки являются одними из лучших в отрасли. Программное обеспечение также предлагает множество дополнительных модулей для специализированных приложений, таких как нелинейный и динамический анализ, анализ усталости и мультифизическое моделирование. Отличительная черта данного расчетного комплекса, это необходимость покупки каждого расчетного модуля для моделирования комплексных систем, требующих решение связанных задач, например, электродинамики и теплопередачи – нагрев активной нагрузки электрической цепи.

в) Elcut – это комплекс модулей, позволяющий решать плоские и осесимметричные прикладные задачи. Обладает интуитивным интерфейсом и прост в использовании. Также способен решать мультидисциплинарные (связанные) задачи. Главным преимуществом данного расчетного комплекса является стоимость относительно других программ моделирования. Однако, выбор решаемых задач весьма ограничен (электрическое и магнитное поля, теплопроводность, механическая прочность и связанные задачи). Помимо этого, нет возможности напрямую работать с получаемыми результатами и модернизировать математические модели.

г) Wolfram Mathematica (WM) – это программное обеспечение, которое включает в себя богатый комплекс методов: аналитическими вычисления и численное моделирование, симуляции и визуализации данных и т.п. Кроме того, в Mathematica можно вызывать и принимать запросы с помощью C, C++, Java и других языков программирования, а также возможно компилировать код во внешние библиотеки. Вместе с тем программа обладает подробной документацией и множеством обзоров по использованию каждого метода. В тоже время для использования всех возможностей необходимо уметь использовать и применять готовые методы, так как WM не имеет рабочего интерфейса для моделирования физических явлений.

Главный недостаток большинства пакетов – это отсутствие доступа к исходному коду, т.е. нет возможности изменять заданные математические

модели и допущения. Однако, в COMSOL Multiphysics есть встроенный язык программирования, напоминающий MatLab. В Wolfram Mathematica возможно не только глубоко изучить как был реализован вычислительный комплекс, но и вносить собственные дополнения в него.

Результаты моделирования в разных пакетах с разными методами решения дифференциальных уравнений обладают хорошим соответствием между собой, что было продемонстрировано в [9-12]. Однако, для моделирования магнитного поля был выбран пакет Wolfram Mathematica. Данный выбор обусловлен прежде всего возможностью применять разные математические выражения и граничные условия для описания объекта исследования. Например, с использованием модели магнитного поля можно создать модель, описывающую тлеющий разряд в скрещенных магнитном и электрическом полях. Помимо этого, доступ к WM имеют множество образовательных и исследовательских учреждений.

В дальнейшем будет проведено сравнение результатов моделирования в созданном модуле по расчету магнитного поля в Wolfram Mathematica 13.1 и в готовом пакете Elcut 5.4.

2 Модель магнитного поля планарного магнетрона

Данная глава посвящена описанию подхода моделирования магнитного поля, а также верификации созданного модуля.

2.1 Проверка математической модели магнитного поля

Для проверки математической модели были получены решение для ряда физических задач, имеющих известное аналитическое решение: кольцо с током, соленоид, соленоид с сердечником.

2.1.1 Математическая модель кольца с током

Одной из самых простых задач по расчету магнитного поля является кольцо с током. Магнитная индукция на оси кольца равна [3]:

$$B_{z_{theory}}(z) = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (16)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $\pi \cdot 4 \cdot 10^{-7}$, I – сила тока в кольце, R – радиус кольца, z – расстояние вдоль оси симметрии кольца.

В частности, в центре витка ($z = 0$) поле равно

$$B_z(0) = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (17)$$

Сравним теоретическое выражение $B_{z_{theory}}$ вдоль оси симметрии с численным решением $B_{z_{model}}$, полученное с помощью МКЭ (рис. 6).

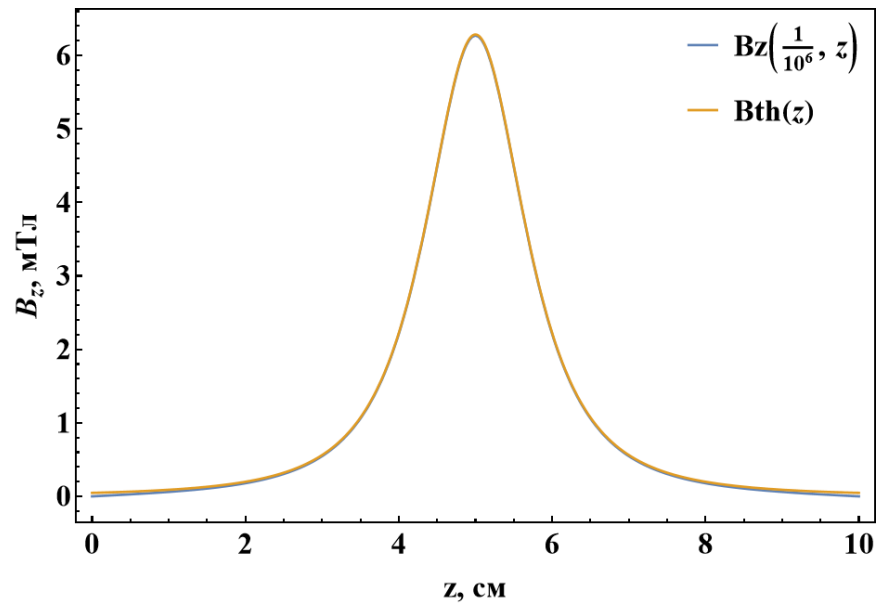


Рисунок 6 – Сравнение решений, полученных с помощью МКЭ и аналитически

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что решения слабо отличаются друг от друга. Для более детального анализа рассмотрим разницу между численными и аналитическими решениями для данной задачи в относительных единицах (рис. 7).

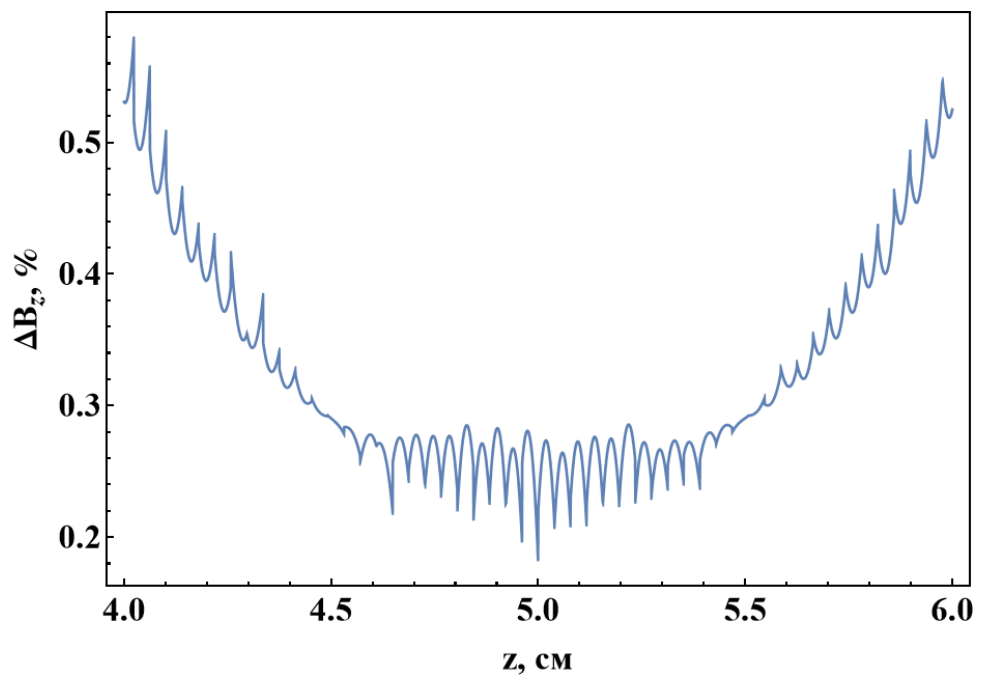


Рисунок 7 – Разность полученных результатов

Таким образом, было получено численное решение для модели магнитного поля кольца с током, а также проведено сравнение с теоретическим выражением.

Точность полученных результатов, относительно аналитического решения, также высока.

2.1.2 Математическая модель соленоида конечной длины

Перейдем к расширенной версии предыдущей задачи – соленоид конечной длины. Для его рассмотрения будем использовать геометрию, представленную на рисунке 8.

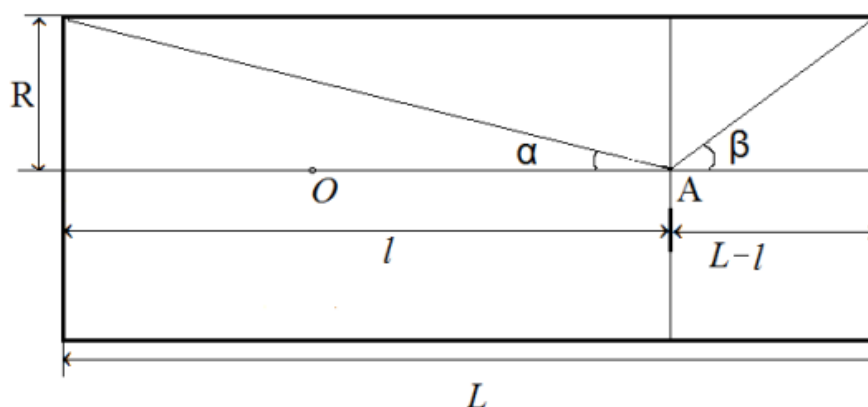


Рисунок 8 – Соленоида с произвольными размерами [13]

Аналитическая формула для магнитной индукции на оси соленоида [3]:

$$B_{z_{theory}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} \left(\frac{l}{\sqrt{R^2 + l^2}} + \frac{L-l}{\sqrt{R^2 + (L-l)^2}} \right), \quad (18)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $\pi \cdot 4 \cdot 10^{-7}$, n – количество витков соленоида на единицу длины, I – сила тока в витке, L – длина самого соленоида, R – радиус соленоида, l – расстояние относительно основание соленоида.

Построим полученные решения на одном графике для их сравнения (рис. 9).

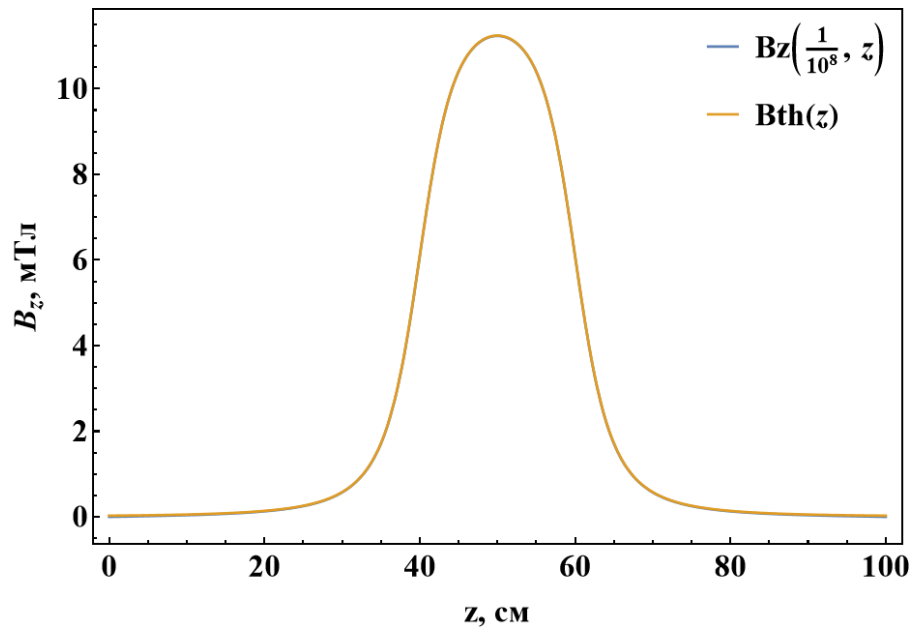


Рисунок 9 – Демонстрация полученных решений для осевой составляющей магнитной индукции соленоида

Из графика видно, что отсутствует заметное различие между численным и аналитическим решениями. Получим разность решений для определения величины отклонения результатов численного моделирования от теоретического выражения (рис. 10).

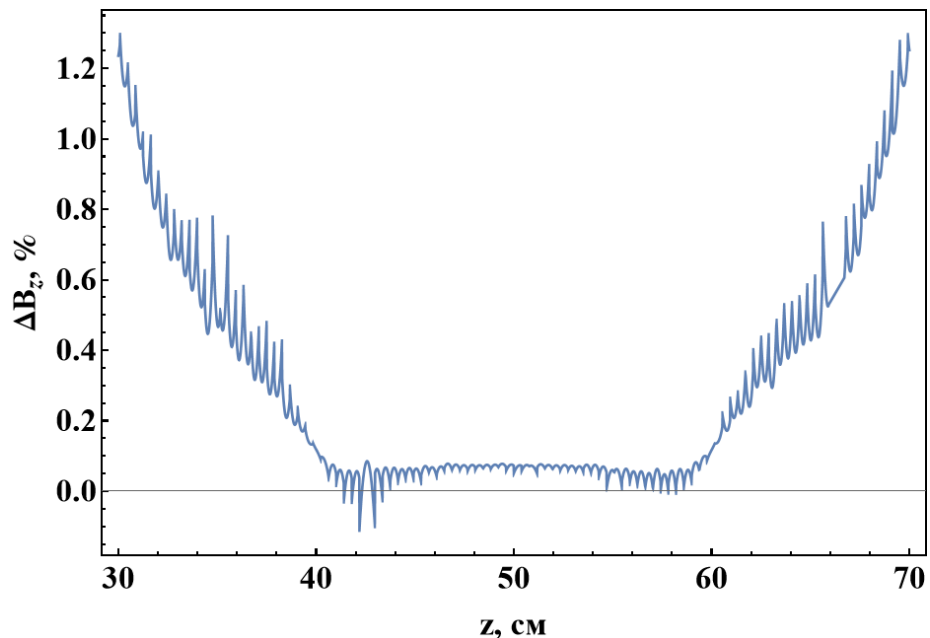


Рисунок 10 – Разность решений, полученных с помощью МКЭ и аналитически

Из полученных результатов можно заключить, что такой способ рассмотрения отлично согласуется с аналитическим решением.

2.1.3 Математическая модель соленоида с сердечником

Более комплексной задачей для расчета магнитного поля является соленоид с сердечником. Аналитическое решение для данного случая можно получить только при использовании допущения о том, что соленоид бесконечно длинный. Тогда магнитная индукция внутри соленоида на оси:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot n, \quad (19)$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника, μ_0 – магнитная постоянная, n – количество витков соленоида на единицу длины, I – сила тока в витке.

Для соответствия с данным допущением был построен соленоид с использованием условия, что его длина много больше его радиуса (больше чем на порядок). Тем самым аналитическое допущение удовлетворено и для численной модели. Графическое представление решения для соленоида с сердечником изображено на рисунке 11.

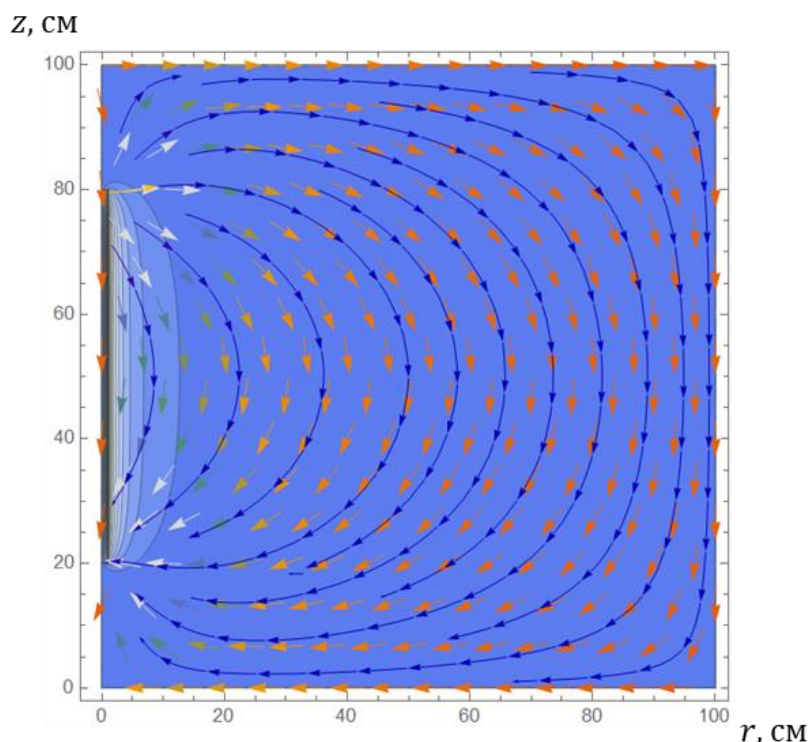


Рисунок 11 – Векторная диаграмма магнитного поля соленоида

Результаты для магнитной индукции на оси соленоида с сердечником представлены на рисунке 12.

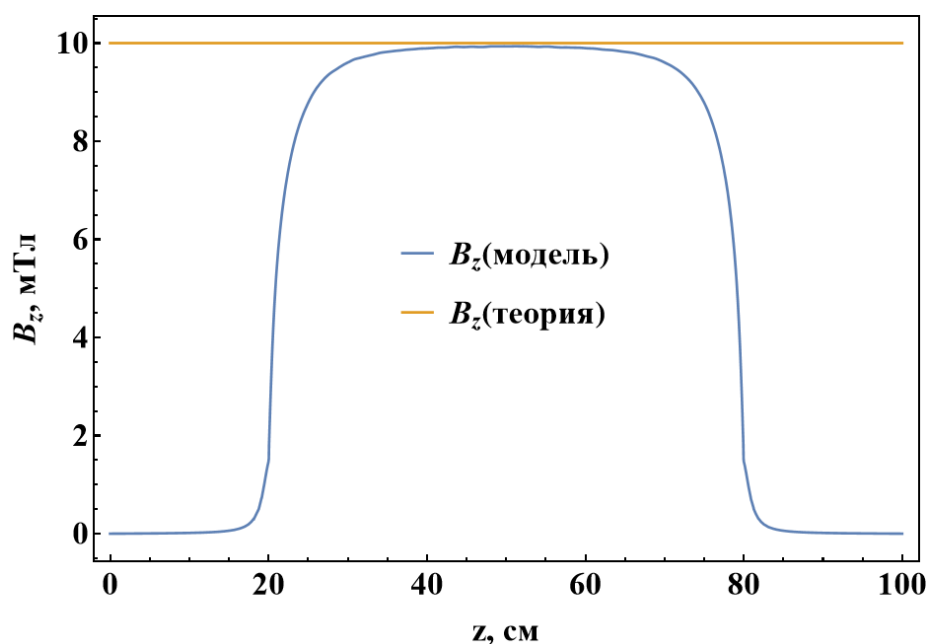


Рисунок 12 – Визуализация полученных решений для осевой составляющей магнитной индукции соленоида с сердечником

Таким образом, можно наблюдать отсутствие сильных расхождений и хорошее соответствие полученного решения с аналитическим на участке самого соленоида (20–80 см). Разница решений на краях соленоида обусловлена тем, что для аналитического решения соленоид рассматривался как для бесконечно длинного объекта без учета краевых эффектов.

2.2 Создание модели магнитного поля планарного магнетрона

Для создания модели магнитного поля магнетрона используется уравнение (9). Однако, в случае магнетрона имеется материал с нелинейными магнитными характеристиками – магнитопровод. Без него силовые линии магнитного поля не будут концентрироваться у поверхности катода, тем самым плазма не будет локализована вблизи мишени. Для учета характеристик магнитопровода были взяты данные кривых намагничивания стали Ст3 [14].

Используя представленные данные построим зависимость для магнитной проницаемости от магнитной индукции согласно уравнению (10) (рис. 13-14):

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (20)$$

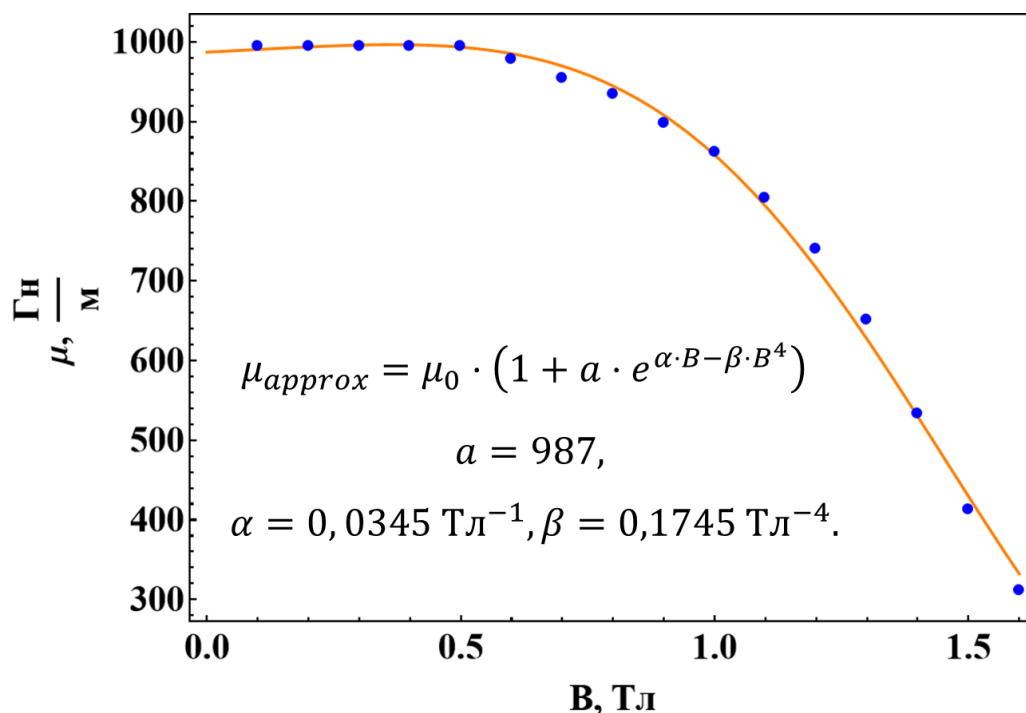


Рисунок 13 – Аппроксимирующая зависимость магнитной проницаемости магнитопровода от магнитной индукции стали Ст3

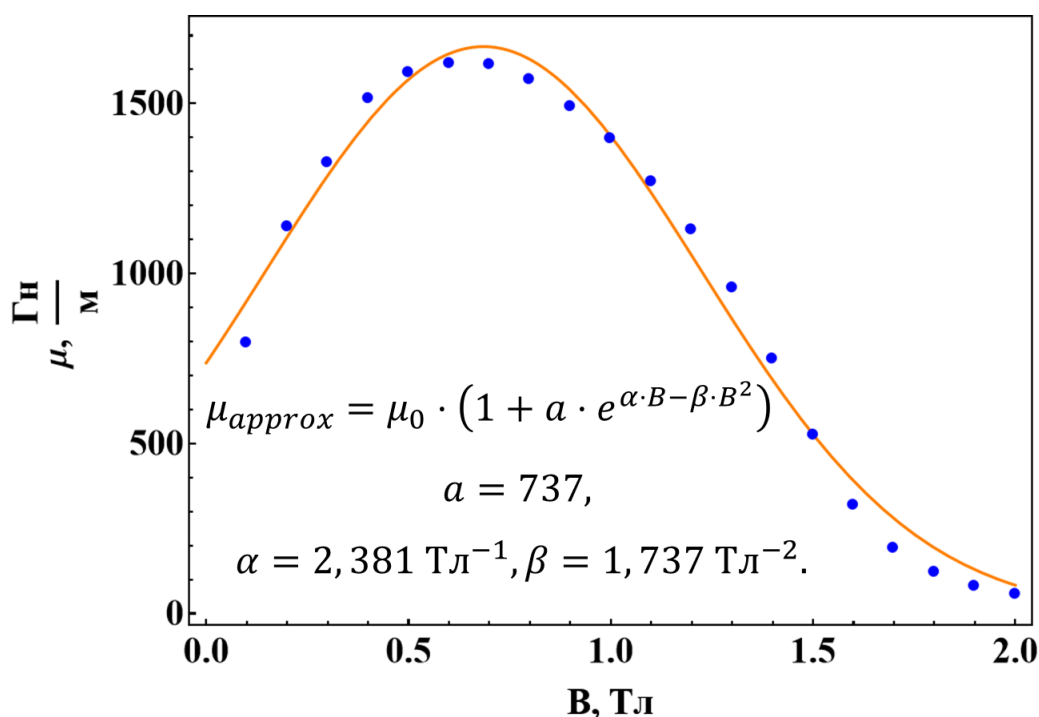


Рисунок 14 – Аппроксимирующая зависимость магнитной проницаемости магнитопровода от магнитной индукции стали Ст3 (для полюсов)

Для всех остальных элементов магнитной системы магнетрона нецелесообразно задавать кривые намагничивания, так как это усложнит

решение задачи и ухудшит сходимость. Помимо этого, магнитные проницаемости элементов слабо отличаются от значения магнитной постоянной. Например, магнитная проницаемость меди составляет $\mu_{Cu} = 0,999994 \cdot \mu_0$.

Теперь перейдем к самому источнику магнитного поля – постоянным магнитам. Для моделирования нашей системы используется модель эквивалентного соленоида с магнитной проницаемостью сердечника равной магнитной постоянной. Значение плотности тока зависит от значения остаточной намагниченности постоянного магнита согласно формуле (10). Значение толщины слоя-проводимости должно быть мало, относительно размеров самих магнитов. По результатам моделирования ряда физических задач (пункты 2.1.1-2.1.3) было определено оптимальное значение толщины поверхностных токов в модели эквивалентного соленоида. При дальнейшем уменьшении величины области тока-проводимости этой области существенно возрастает количество элементов, а изменения результатов незначительны.

Для решения дифференциальных уравнений в частных производных необходимо использовать граничные условия. В нашей модели этими условиями являются как граничное условие Дирихле на каждой грани рассматриваемой области, так и Неймана на оси симметрии:

$$A|_{r=0||r=R||z=-H||z=H} = 0, \quad \left. \frac{\partial A}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (21)$$

где $H = R = 0,3$ м.

Важно отметить, что исследуемая область была много больше, чем размеры самих магнетронов. Это было сделано специально, чтобы учесть специфику магнитного поля – оно неограниченно распространяется в объеме и не может быть ничем изолировано в полной мере. Однако, в численной модели используется граничное условие Дирихле, использование которого на границе области означает магнитоизоляцию этой самой грани, что не справедливо в действительности. Как раз для избегания нефизических допущений область для магнитного поля должна быть много больше размеров магнетрона.

Для сравнения приведена область как с малыми (слева, рис. 15), так и с большими размерами (справа, рис. 15), которая как раз и использовалась в модели.

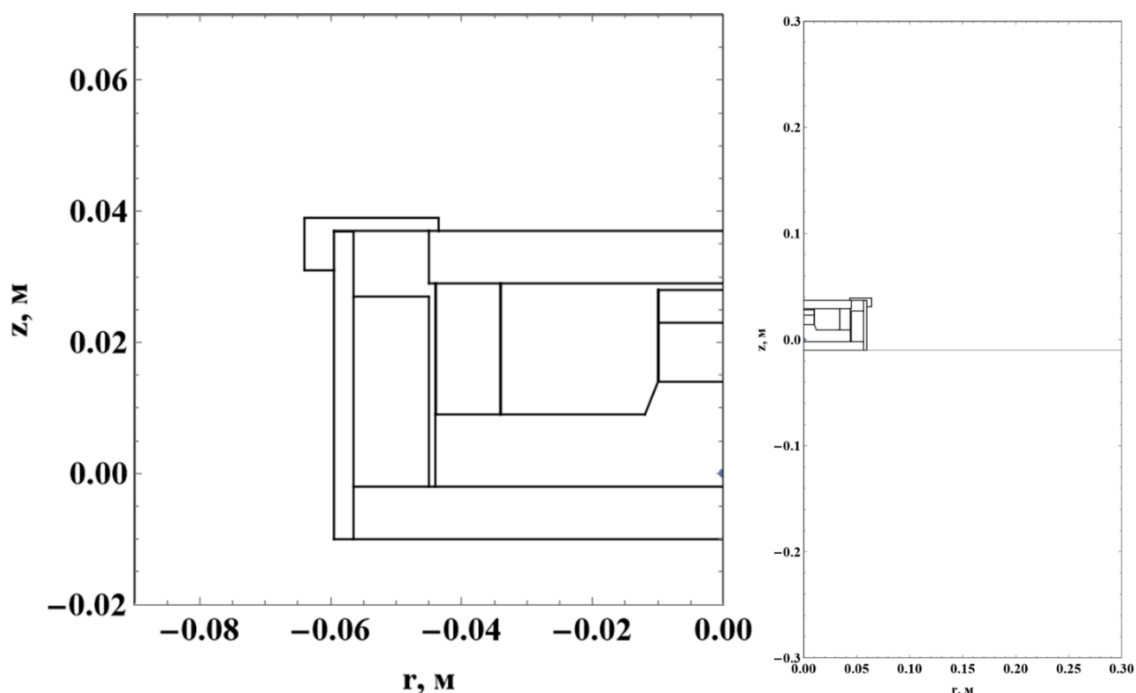


Рисунок 15 – Размер исследуемой области на примере симметричного магнетрона

Для использования МКЭ в целях решения дифференциального уравнения в частных производных необходимо построение конечноэлементной сетки. Методы её построения в разных вычислительных комплексах свои. В WM (в разрабатываемом модуле) размер КЭ в каждой области составлял 10^{-6} м, а общее число элементов превышает 400000. Однако, в Elcut не удалось осуществить такие параметры сетки из-за вычислительных характеристик ЭВМ, поэтому параметр размера КЭ составил лишь 10^{-4} м и общее число элементов 200000.

Во избежание расходимости из-за разницы в порядках физических величин было проведено обезразмеривание дифференциального уравнения.

Безразмерные переменные вводятся следующим образом:

$$\mu = \hat{\mu} \cdot \mu', A = \hat{A} \cdot A', r = \hat{r} \cdot r', z = \hat{z} \cdot z', j = \hat{j} \cdot j'. \quad (22)$$

Подставим введенные выше переменные в уравнения (9):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\hat{z} \cdot \partial z'} \left(\frac{1}{\hat{\mu} \cdot \mu'_r} \frac{\hat{A} \cdot \partial A'_\theta}{\hat{z} \cdot \partial z'} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\hat{r} \cdot \partial r'} \left(\frac{1}{\hat{r} \cdot \hat{\mu} \cdot r' \mu'_z} \frac{\hat{r} \cdot \hat{A} \cdot \partial(r' A'_\theta)}{\hat{r} \cdot \partial r'} \right) = -\hat{j} \cdot j'_\theta \end{aligned} \quad (23)$$

Сократим повторяющиеся переменные в (19) и перенесем нулевые составляющие в правую часть:

$$\frac{\hat{r}^2}{\hat{z}^2} \cdot \frac{\partial}{\partial z'} \left(\frac{1}{\mu'_r} \frac{\partial A'_\theta}{\partial z'} \right) + \frac{\partial}{\partial r'} \left(\frac{1}{r' \mu'_z} \frac{\partial(r' A'_\theta)}{\partial r'} \right) = -\frac{\hat{j} \cdot \hat{r}^2 \cdot \hat{\mu}}{\hat{A}} \cdot j'_\theta. \quad (24)$$

В дальнейшем опустим нижние индексы для простоты записи. Теперь комплекс параметров в правой части приравняем к единице, а в дроби у второго члена левой части приравняем переменные:

$$\hat{r} = \hat{z}, \frac{\hat{j} \cdot \hat{r}^2 \cdot \hat{\mu}}{\hat{A}} = 1 \Rightarrow \hat{A} = \hat{j} \cdot \hat{r}^2 \cdot \hat{\mu}. \quad (25)$$

Порядки переменных в уравнении (9) различны

$$j \sim 10^9 \frac{\text{А}}{\text{м}} \text{ при } B_{\text{ост}} = 1 \text{ Тл, а } \mu_0 = 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \text{ и } \mu > 10^{-3} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}. \quad (26)$$

Вследствие чего могут возникать ошибки при определении функции \vec{A} . Во избежание возможных расхождений зафиксируем значения $\hat{A} = 10^8 \text{ Тл} \cdot \text{м}$, $\hat{j} = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$, $\hat{r} = \hat{z} = 1 \text{ м}$, дабы привести переменные в уравнение (20) к одному порядку.

Таким образом, математическая модель магнитного поля планарного магнетрона в ЦСК была записана следующим образом:

$$\begin{aligned} & \nabla_{r',z'} \cdot \left[\frac{1}{\mu'(r',z')} \nabla_{r',z'} (A'(r',z')) \right] - \\ & - \left(\frac{A'(r',z')}{\mu'(r',z') \cdot r'^2} - \frac{1}{r'} \nabla_{r',z'} \cdot A'(r',z') \right) = \\ & = \frac{\hat{j} \cdot \hat{r}^2 \cdot \hat{\mu}}{\hat{A}} \cdot j'(r',z') \end{aligned} \quad (27)$$

И

$$A'(r, z) = \frac{A(r, z)}{\mu(r, z)}. \quad (28)$$

Далее необходимо вернуться в первоначальным единицам измерения, чтобы получить размерность для магнитной индукции в тесла, используя уравнение (4):

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}' \cdot \frac{\hat{A}}{\hat{r}}. \quad (29)$$

2.3 Модель симметричного магнетрона

Модель магнетрона и его магнитное поле изображено на рисунке 16:

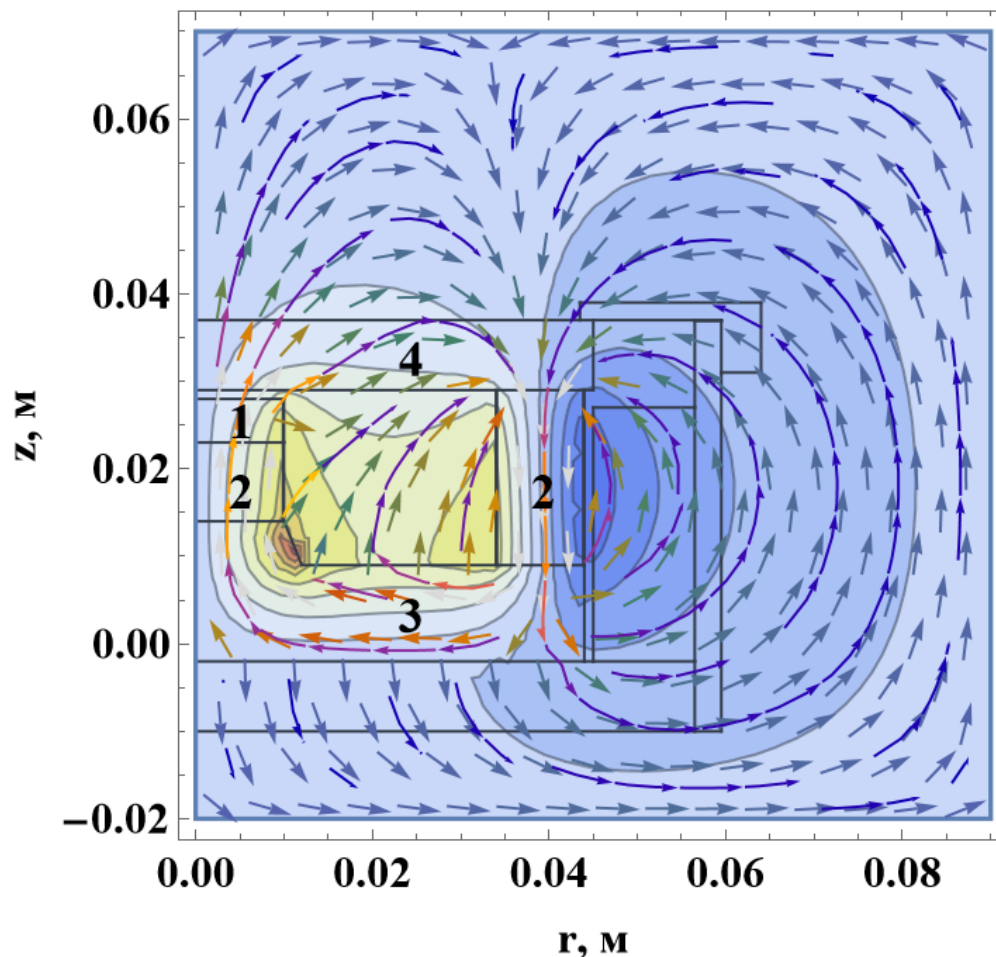


Рисунок 16 – Магнитное поле магнитной подсистемы симметричного магнетрона: 1 – магнит NdFeB, 2 – магнит $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, 3 – магнитопровод, 4 – мишень

Данный магнетрон много раз модернизировался и разбирался. Достоверно известны следующие параметры системы:

- Мишень – цилиндр, $\varnothing 90\text{мм} \times 8\text{мм}$;
- Постоянный магнит NdFeB – цилиндр, $\varnothing 20\text{мм} \times 5\text{мм}$;
- Постоянные магниты $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ – три цилиндра, каждый из которых $\varnothing 20\text{мм} \times 3\text{мм}$, а также кольцо $\varnothing 68 - \varnothing 88\text{мм} \times 20\text{мм}$.

В случае цилиндрической симметрии модель симметричного магнетрона с элементной сеткой выглядит следующим образом (рис. 17):

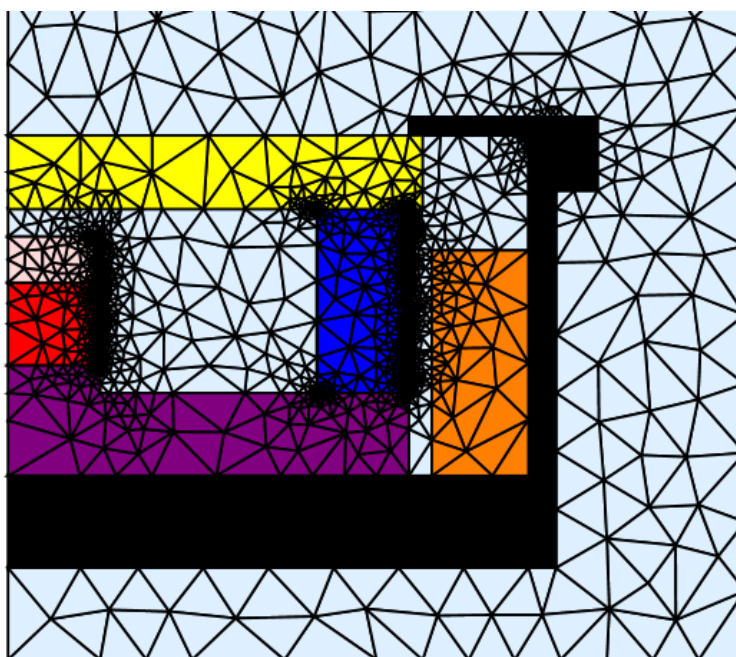


Рисунок 17 – Визуализация симметричного магнетрона с сеткой малого порядка

Черные объекты – материалы из немагнитной стали, красный и синий – постоянные магниты ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ марки H32 и XGS32, соответственно), розовый – постоянный магнит (NdFeB марка N52), фиолетовый – электротехническая сталь, желтый – мишень из хрома, оранжевый – медный корпус. Объекты, не выделенные цветом (белый) – воздух.

2.4 Модель “кусочного” магнетрона

Чертёж магнетрона, для которого был создан и проведен расчет модели магнитного поля, представлен на рисунке 18.

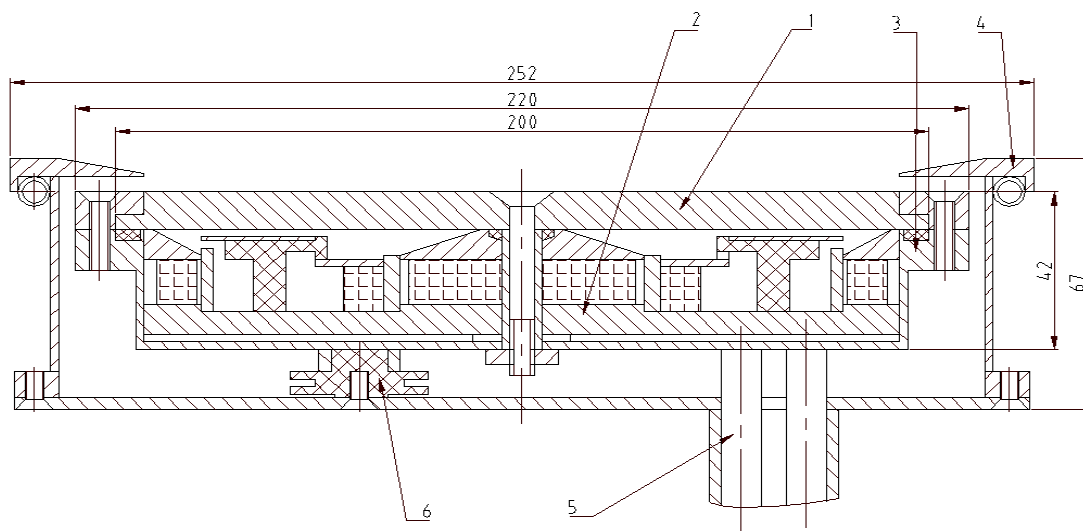


Рисунок 18 – Магнетронная распылительная система:

1 – катод, 2 – магнитопровод, 3 – каркас, 4 – анодный блок, 5 – система охлаждения, 6 – изолятор

В случае цилиндрической симметрии модель кусочного магнетрона с элементной сеткой выглядит, как показано на рисунке 19.

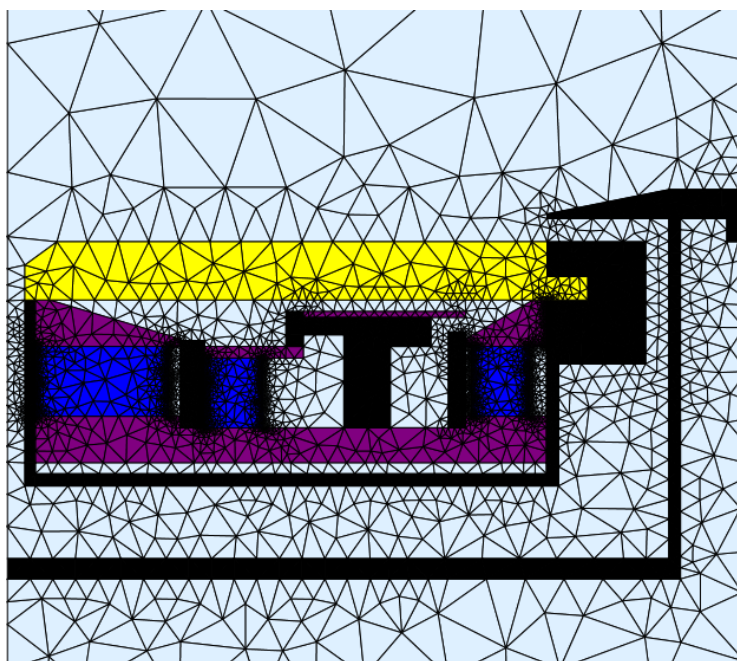


Рисунок 19 – Визуализация кусочного магнетрона с сеткой малого порядка

Черные объекты – материалы из немагнитной стали, синие – постоянные магниты ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ марки S22), фиолетовые – электротехническая сталь (верхние из стали Ст3 для полюсов, а нижние из стали Ст3), желтый – мишень из титана; Объекты, не выделенные цветом (белый) – воздух.

3 Результаты исследований и анализ

3.1 Экспериментальная часть

Для проверки модели на адекватность был проведен эксперимент по измерению магнитного поля магнетрона. С этой целью использовалось измерительное устройство миллитесламетр ТП2-2У. Начало отсчета измерений находилось на расстоянии 10 мм от поверхности анодного кольца магнетрона. Данное расстояние обусловлено размерами измерительного зонда типа «С» – определение двух составляющих магнитной индукции ближе невозможно. Схематичное представление экспериментального стенда для измерения магнитной индукции представлено на рисунке 23.

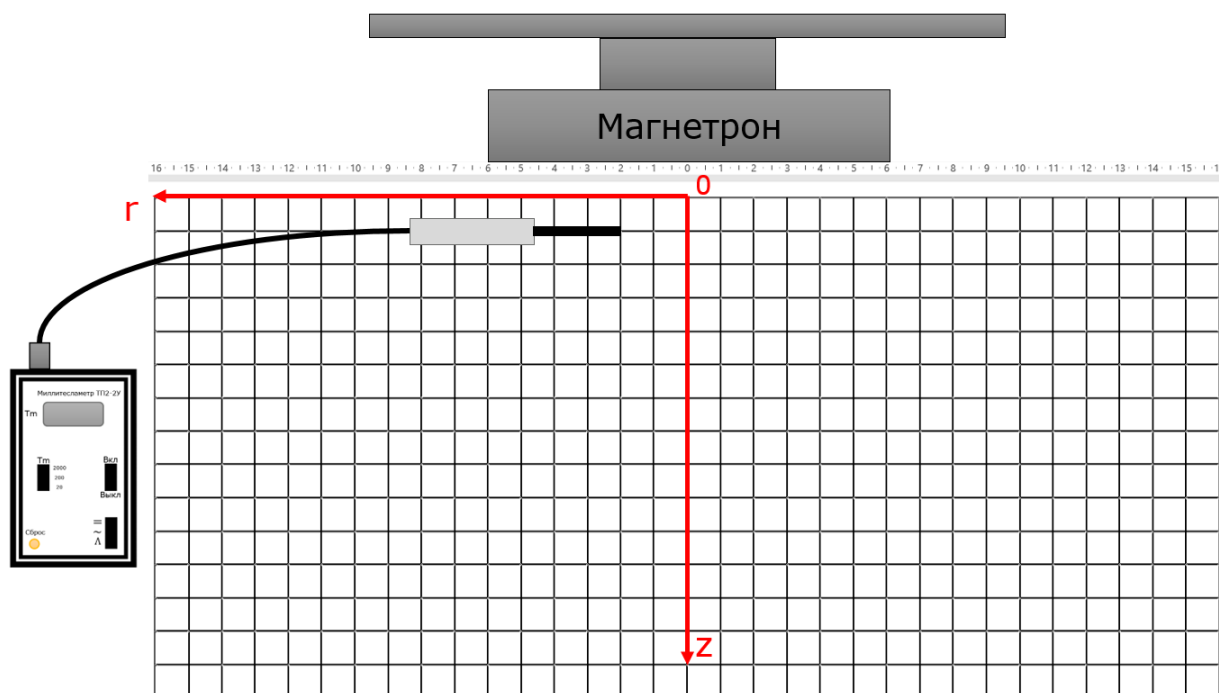


Рисунок 20 – Схема стенда для измерения магнитного поля магнетрона

Принцип работы миллитесламетра основан на эффекте Холла в полупроводнике. Когда полупроводник с током, текущим в одном направлении, вводится перпендикулярно магнитному полю, возникает напряжение под прямым углом к пути тока. Величина этого напряжения (напряжения Холла) пропорциональна напряженности магнитного поля. Далее по этой разности потенциалов устройство калибруется по известному магнитному полю, например, в соленоиде с током или кольцо Гельмгольца.

3.1.1 Симметричный магнетрон

Для симметричного магнетрона было произведено измерение двух проекций магнитной индукции (осевая V_z и радиальная V_r) по три раза в каждой точке с шагом 1 см в двух направлениях – r и z . Последний измерительный ряд находился на высоте 57 мм от поверхности катода. Общее число экспериментальных данных составило 420. Эмпирические результаты для симметричного магнетрона представлены на рисунках 24.

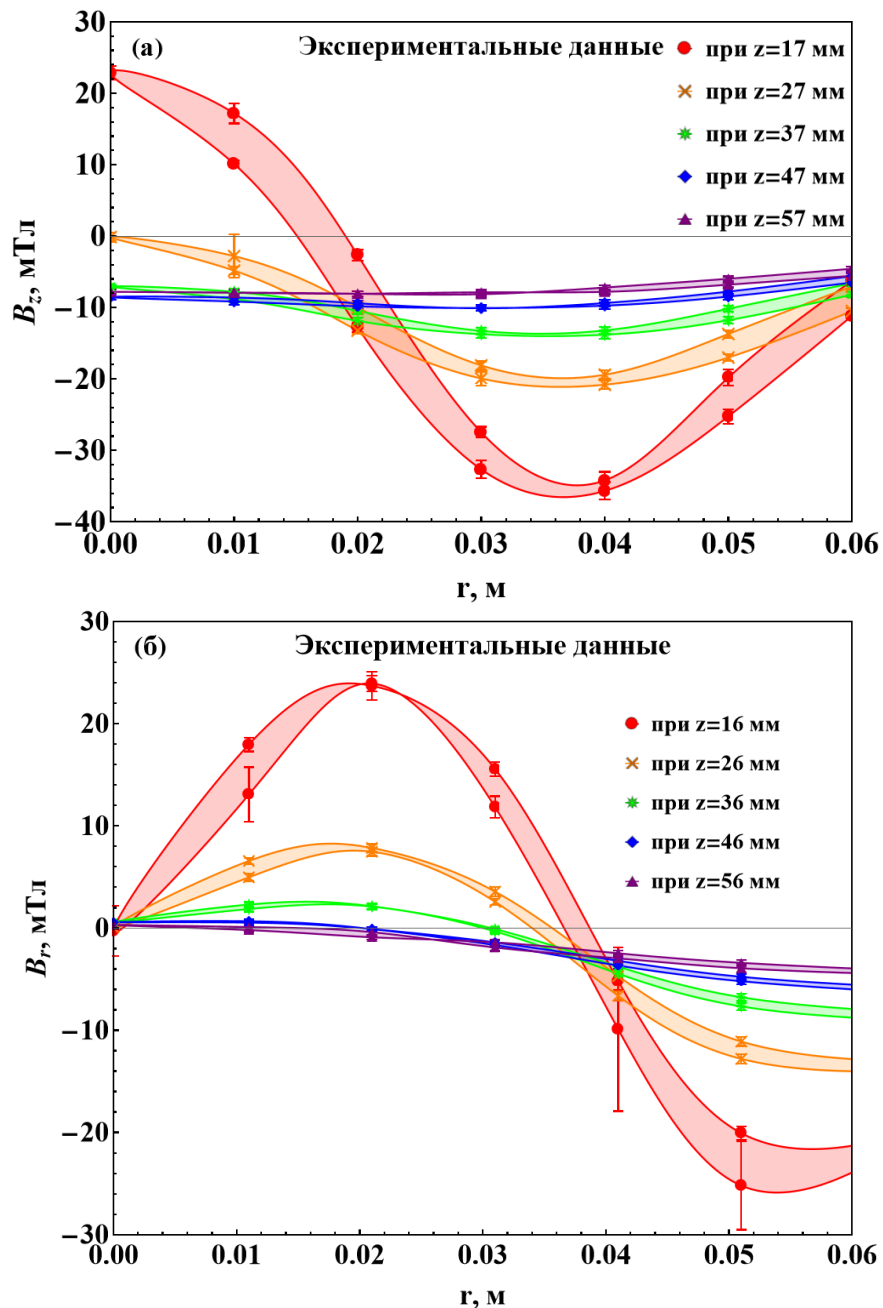


Рисунок 21 – Экспериментальные данные симметричного магнетрона для V_z (а) и V_r (б)

Погрешность рассчитывалась согласно ГОСТ Р 8.736— 2011.

Для этого сначала находилось среднее квадратичное отклонение среднего арифметического

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}}. \quad (30)$$

Тогда доверительные границы случайной погрешности вычисляются по формуле

$$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{x}}, \quad (31)$$

где t – коэффициент Стьюдента, равный 4,3 для трех измерений.

Систематическая относительная погрешность прибора определялась согласно паспорту прибора:

$$\theta_{\Sigma} = \delta \cdot \frac{B_{и}}{100} = \pm \left[2 + 0,1 \cdot \left(\frac{B_{п}}{B_{и}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{B_{и}}{100}, \quad (32)$$

где $B_{п}$ – предел измерения миллитесламетра, мТл, $B_{и}$ – показание миллитесламетра.

Среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности

$$S_{\theta} = \frac{\theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}}. \quad (33)$$

Суммарное среднее квадратическое отклонение оценки измеряемой величины вычисляют по формуле:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta}^2 + S_{\bar{x}}^2}. \quad (34)$$

Доверительные границы погрешности измерения магнитной индукции для случайных и систематических погрешностей определяются следующим образом:

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma}, \quad (35)$$

где коэффициент K зависит от числа неисключенных систематических погрешностей, который равен

$$K = \frac{\varepsilon + \theta_{\Sigma}}{S_{\theta} + S_{\bar{x}}}. \quad (36)$$

Как видно из представленных зависимостей, магнитное поле в положительном (верхние значения) и отрицательном (нижние значения) направлениях относительно оси симметрии (см. рис. 24) разное – это весьма неожиданный результат для данного магнетрона. Причиной тому могли бы быть: неоднородное намагничивание постоянных магнитов или смещение центра измерительного стенда, но оценочные расчеты не подтверждают эти предположения. Данная зависимость имеет систематический характер: значения отличаются именно по разную сторону от оси симметрии. Объяснение этой особенности приведено в пункте 3.3.1.

3.2 Результаты моделирования в Wolfram Mathematica и Elcut

Моделирование магнитного поля планарного магнетрона было выполнено с использованием математической модели и граничных условий, описанных в пункте 2.2. В обоих пакетах используемые допущение, симметрия и параметры системы были идентичны. Единственными различиями между подходами моделирования являются количество элементов сетки в исследуемой области, а также методы её построения. Результаты численного моделирования приведены вместе с экспериментальными данными в последующем пункте 3.3.

3.3 Сравнение экспериментальных данных и численных решений для магнитных полей магнетронов

Для проверки используемой математической модели и допущений необходимо провести сравнения решений, полученных численным моделированием, с эмпирическими данными.

3.3.1 Сравнение для симметричного магнетрона

Для симметричного магнетрона зависимости проекций магнитной индукции представлены на рисунке 26.

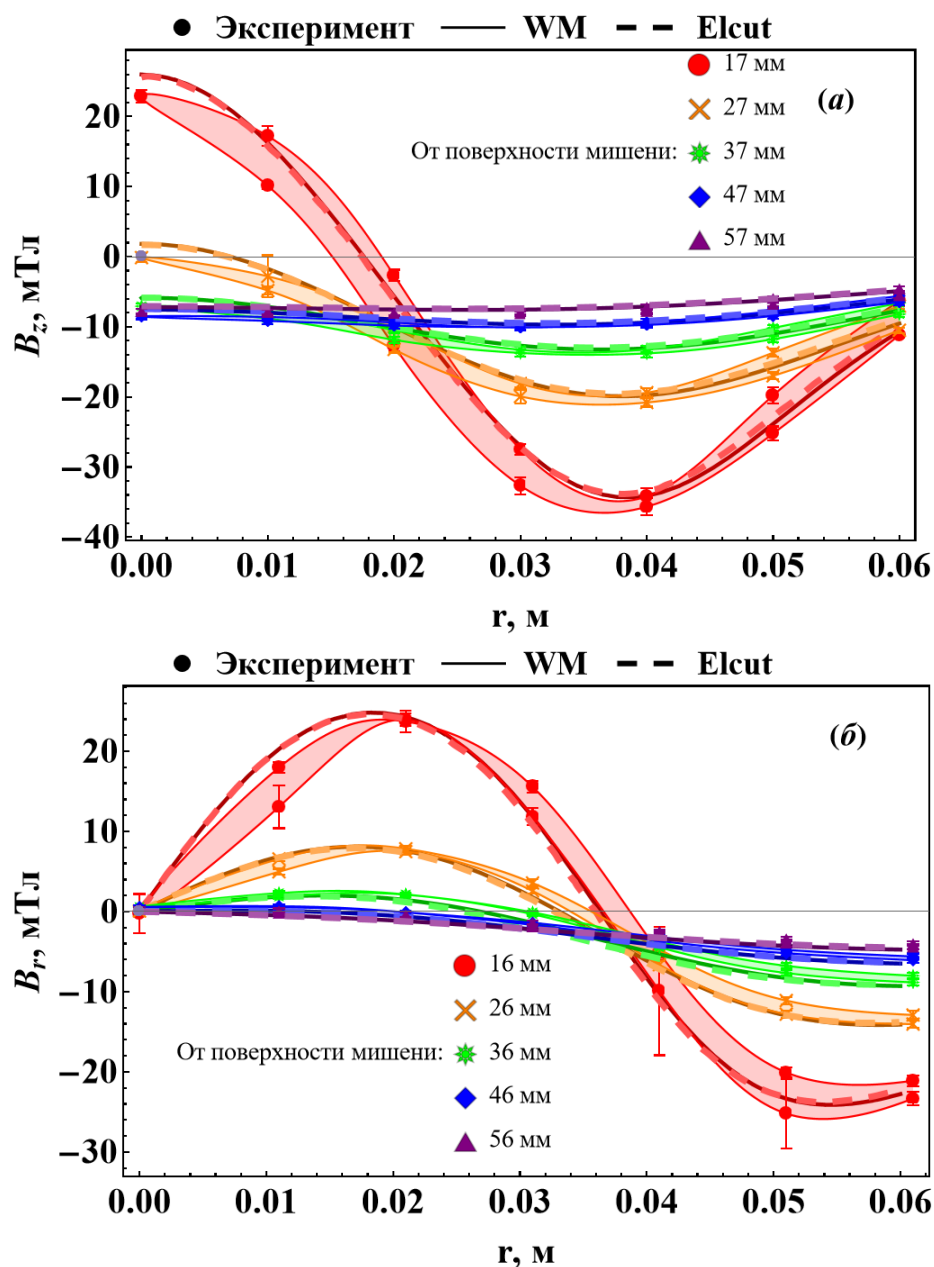


Рисунок 22 – Зависимости магнитной индукции симметричного магнетрона для B_z (а) и B_r (б) от расстояния до оси симметрии

Из графика 26 видно, что имеется полное соответствие между результатами моделирования в WM и Elcut для $B_z(r)$. Помимо этого, наблюдается хорошее согласие с эмпирическими данными – во многих случаях численные решения лежат в пределах погрешности. Вместе с тем, в зависимостях для $B_r(r)$ наблюдается малое отклонения между численными решениями в разных пакетах – это более заметно при детальном рассмотрении. Основная причина этому –

разные методы построения сетки и количество элементов в исследуемой области.

Однако, это не отменяет того факта, что экспериментальные значения отличаются (в разных направлениях) по разную сторону относительно оси симметрии. Для качественного объяснения была рассмотрена модель с учетом технологического отверстия, которое могло послужить появлению асимметричности в эмпирических данных. Под технологическим отверстием стоит понимать крепление, с помощью которого магнитопровод присоединен к корпусу магнетрона (см. рис. 27).



Рисунок 23 – Технологическое отверстие в симметричном магнетроне

Размеры технологического отверстия точно неизвестны, но их можно оценить из рисунка 27. В нашей модели это выглядит как показано на рисунке 28.

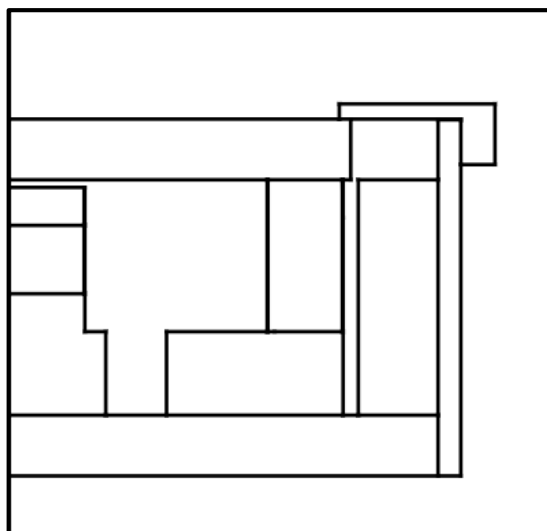


Рисунок 24 – Модельное представление магнетрона с технологическим отверстием

Для двумерной модели это означает не просто отверстие, а вырез (траншея, овраг, ров) по всему периметру магнитопровода, поэтому это может дать лишь качественную оценку. Для количественной следует строить трехмерную модель, но сходимость там значительно хуже. Результаты симметричного магнетрона для зависимостей проекций магнитной индукции с технологическим отверстием представлены на рисунке 29. Чтобы сравнение было более наглядным приведены также результаты без отверстия.

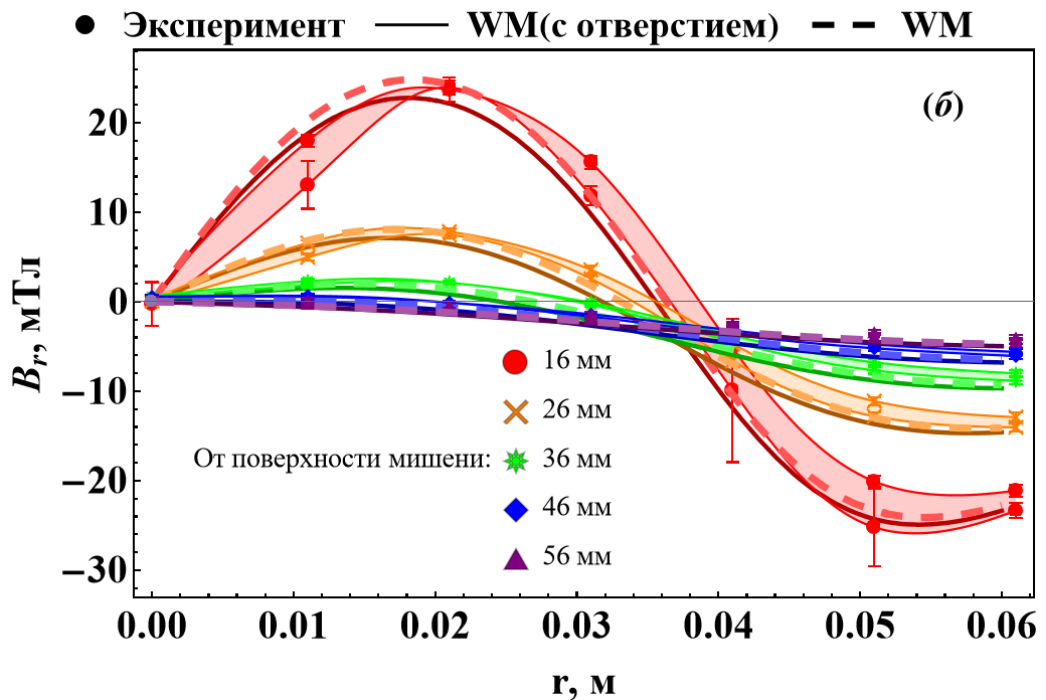
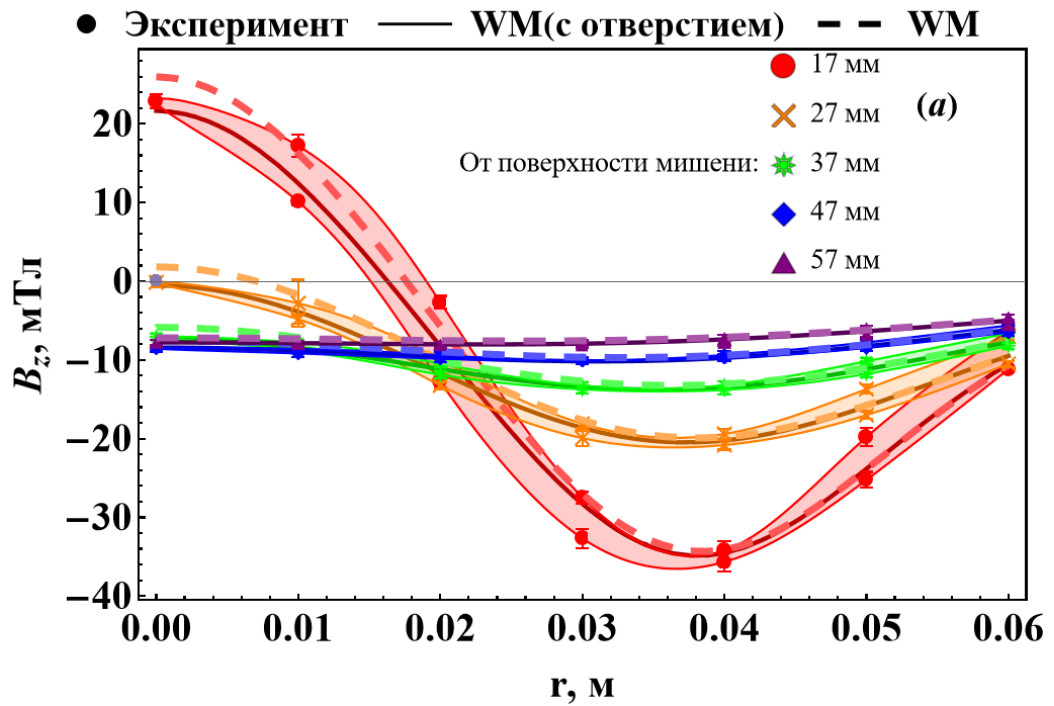


Рисунок 25 – Зависимости магнитной индукции симметричного магнетрона с технологическим отверстием и без него для B_z (а) и B_r (б) от расстояния до оси симметрии

Как видно из рисунка 29, значения магнитной индукции снизились для обеих проекций магнитной индукции. Также полученная зависимость близка к нижним значениям экспериментальных данных для B_z . Однако, в случае радиальной составляющей магнитной индукции численные решения хуже

согласуются с эмпирическими данными, чем при отсутствии технологического отверстия. На основании этого предполагается, что разница значений магнитной индукции по разную сторону от оси симметрии связаны с наличием технологического отверстия, что качественно подтверждается численным моделированием. Для количественных расчетов необходимо использовать 3D модель, вместе с тем модель проигрывает в сходимости численного метода.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработок;
- планирование научно–исследовательской работы;
- расчет бюджета научно–исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

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

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Инициация проекта является первым этапом жизненного цикла проекта. Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат проекта.

Таблица 1 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Студент	Создание математической модели в специальной среде (ANSYS, COMSOL, ELCUT, Wolfram и т.п.). Приобретение навыков расчета магнитного поля для технических устройств.
Научный руководитель	Оптимизация процесса нанесения тонких пленок для более скоростного и равномерного нанесения.
Разработчики инженерных программных обеспечений	Расширить возможности своих сред для широкого комплекса магнетронных устройств.
Исследовательские лаборатории	Может быть использована для других установок при модернизации модели.

Таблица 2 – Цель и результаты проекта

Цель проекта:	Создание физико-математической модели для описания поведения плазмы в магнетронной распылительной системе.
Ожидаемые результаты проекта:	Завершение модели плазмы в MPC и поиск оптимальных параметров системы.
Критерии приемки результата проекта:	Проверка модели на адекватность (сравнение прогнозируемых параметров с действительными); Сравнение результатов отдельных этапов проекта с решениями, полученными с помощью других сред программирования.
Требования к результату проекта:	Требование:
	Рабочая математическая модель магнитного поля в MPC.
	Среда работы: ANSYS, COMSOL, Wolfram.

Ограничения и допущения проекта:

- Использование ограниченное количество (основных) уравнений для электромагнитных полей;
- Рассмотрение математической модели, а не реального физического объекта;
- Ограничение в навыках и знаниях по работе с моделями в разных средах, а также магнитным полем;
- Временное ограничение, обусловленное учебным планом и загруженности учебного руководителя.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В теоретических работах преобладает комплексное решение нескольких задач (уравнений), которые не имеют аналитического решения, а решения могут быть получены только численным путем. Тем самым основополагающим фактором, с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, является функциональность используемого пакета (среды) – насколько гибок и применим к рассматриваемой системе.

Помимо этого, не мало важным фактором является скорость обработки данных и вычисление параметром заданной системы. Наличие множества элементов сетки замедляет работу используемого пакета Wolfram Mathematica и решение этой проблемы остается актуальным. Одним из предложенных решений в данной работе является использование кластера (группы компьютеров, суперкомпьютер).

Главным преимуществом рассматриваемого подхода является использование широко спектра методов для анализа получаемых результатов, а также полный доступ к результатам моделирования магнитной подсистемы. Остальные рассматриваемые среды (такие, как COMSOL и Elcut) не предполагают прямой доступ к полученным решениям. Также необходимо упомянуть, что COMSOL имеет широкий ассортимент для демонстрации и визуализации выходных данных. Однако, при каждом повторном моделировании системы при неизменных параметрах наблюдается изменения в конечных результатах.

ф – Wolfram Mathematica, к1 – COMSOL, к2 – Elcut.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Область возможностей моделирования	0,25	5	4	3	1,25	1	0,75
2. Возможности анализа выходных данных	0,15	5	3	2	0,75	0,45	0,3
3. Гибкость граничных условий	0,1	3	4	2	0,3	0,4	0,2
4. Скорость расчетов	0,1	3	3	2	0,3	0,3	0,2
5. Точность расчетов	0,15	4	4	4	0,6	0,6	0,6
6. Простота эксплуатации	0,1	1	4	3	0,1	0,4	0,3
Экономические критерии оценки							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	5	4	2	0,25	0,2	0,1
3. Цена	0,05	3	2	4	0,15	0,1	0,2
Итого	1	33	32	26	3,9	3,65	2,85

Таким образом, показатели у Wolfram Mathematica и Comsol имеют близкие численные значения. Исходя из этого данный проект конкурентоспособен, несмотря на слабые стороны (гибкость граничных условий и простота эксплуатации). Главный фактором, выделяющий рассматриваемый пакет в работе, является возможности анализа выходных данных.

4.1.3 Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. По своему содержанию данный инструмент близок к методике оценки конкурентных технических решений, описанных в разделе 4.1.2.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка; - пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность. - правовая защищенность и др.

2) Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD рекомендуется оценку проводить в табличной форме (табл. 4).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 4 – Оценка QuaD.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Качество интеллектуального интерфейса	0,1	70	100	0,7	0,07
2. Точность	0,2	80	100	0,8	0,16
3. Унифицированность	0,1	60	100	0,6	0,06
4. Потребность в ресурсах памяти	0,15	100	100	1	0,15
5. Простота эксплуатации	0,1	60	100	0,6	0,06
6. Функциональная мощность	0,15	90	100	0,9	0,135
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
7. Конкурентоспособность продукта	0,05	75	100	0,75	0,0375
8. Уровень проникновения на рынок	0,05	75	100	0,75	0,0375
9. Цена	0,05	85	100	0,85	0,0425
10. Финансовая эффективность научной разработки	0,05	95	100	0,95	0,0475

Итого	1	770	1000	7,7	0.8
--------------	---	-----	------	-----	-----

В результате анализа оценочной карты было выявлено, что рассматриваемый пакет, в сравнении с аналогами, является самым ресурсоэффективным по совокупности факторов. Наиболее близко к нему расположился пакет COMSOL Multiphysics, что вполне очевидно, так как это одна из наиболее распространенных и популярных программ для моделирования физических явлений.

4.1.4 SWOT-анализ

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

Таблица 5 – SWOT-анализ

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	<p>С1. Востребованность модели как в научных целях, так и в производственных.</p> <p>С2. Возможность интегрирования созданного модуля в стандартные языки программирования (С, С++).</p> <p>С3. Использование одной из самых популярных и интенсивно развивающейся среды Wolfram.</p> <p>С4. Конструирование новых магнетронов на основе созданной модели.</p>	<p>Сл1. Высокая сложность работы (огромное количество переменных и параметров системы).</p> <p>Сл2. Использование специфичной среды (Wolfram Mathematica) – высокий порог вхождения в пользования программы.</p> <p>Сл3. Высокие вычислительные требования к ЭВМ.</p>

<p>Возможности: В1. Гибкость модели в изменении параметров по сравнению с проведением эксперимента. В2. Использование промышленными предприятиями. В3. Возможность моделирования системы для последующего масштабирования.</p>	<p>Созданная модель может множество раз использоваться и модернизироваться для создания магнитных устройств катодного распыления.</p>	<p>Изучение англоязычных статей по работе с магнетронами и их математическими моделями. Изучение методов моделирования в Wolfram Mathematica.</p>
<p>Угрозы: У1. В случае наличия расхождений полученных результатов между прогнозированием модели и действительными – потеря множества времени и мыслительных ресурсов. У2. Наличие других аналогичных пакетов моделирования. У3. Отсутствие графического интерфейса может вызывать сложности у пользователей (Wolfram).</p>	<p>Аналогичные программы по выполняем задачам можно использовать для описания своей установки и её улучшения. Также есть множество других сред (Elcut, COMSOL) для описания необходимых свойств системы.</p>	<p>Учесть конструкционные особенности магнитных систем в MPC.</p>

Второй этап заключается в построении интерактивных матриц возможностей и угроз, позволяющих оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации, на основании матрицы SWOT.

Таблица 6 – Интерактивная оценка проекта «Связь сильных сторон с возможностями»

	C1	C2	C3	C4
B1	+	+	+	-
B2	+	0	-	+
B3	+	-	0	+

Таблица 7 – Интерактивная оценка проекта «Связь слабых сторон с возможностями»

	В1	В2	В3
Сл1	+	-	+
Сл2	+	-	+
Сл3	-	-	+

Таблица 8 – Интерактивная оценка проекта «Связь сильных сторон с угрозами»

	С1	С2	С3	С4
У1	+	-	+	-
У2	+	-	-	+
У3	-	+	+	+

Таблица 9 – Интерактивная оценка проекта «Связь слабых сторон с угрозами»

	У1	У2	У3
Сл1	+	+	+
Сл2	+	+	+
Сл3	+	+	+

В результате SWOT-анализа было выявлено, что работа является перспективной за счет гибкости системы и большого многообразия готовых методов для анализа выходных данных. Однако, замечено, что для использования всех возможностей Wolfram Mathematica необходимо хорошее знание не только её документации, но и методов создания и решения математических моделей.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы приведён в таблице 10. Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя.

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
	2	Календарное планирование работ	Научный руководитель
Теоретические исследования	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Изучение методов описания модели	Инженер
	5	Построение модели	Научный руководитель, инженер
	6	Изучение полученных зависимостей	Научный руководитель, инженер
Экспериментальные исследования	7	Составление плана экспериментов	Научный руководитель, инженер
	8	Подготовка стенда для экспериментальных работ	Инженер
	9	Проведение эксперимента	Научный руководитель, инженер
	10	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Инженер
	12	Выделение основных закономерностей	Научный руководитель, инженер
	13	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Научный руководитель, инженер
Оформление отчёта по НИР	14	Составление пояснительной записки	Инженер
	15	Подготовка к защите работы	Инженер

4.2.2 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 $t_{ожi}$ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5}, \quad (43)$$

где $t_{ож i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; $t_{min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.; $t_{max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , 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%.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (44)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.; $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

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

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (45)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях; T_{pi} – продолжительность выполнения i -ой работы в рабочих днях; $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (46)$$

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.

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Название работ	Трудоемкость работ			Исполнитель	Т _р , раб. дн.	Т _к , кал. дн.
		t _{min} чел-дн.	t _{max} чел-дн.	t _{ож i} чел-дн.			
1	Составление и утверждение технического задания	2	4	2,8	Научный руководитель	2,8	4,144
2	Календарное планирование работ	1	3	1,8	Научный руководитель	1,8	2,664
3	Подбор и изучение материалов по теме	7	12	9	Инженер	9	13,32
4	Изучение методов описания модели	5	10	7	Инженер	7	10,36
5	Построение модели	6	10	7,6	Научный руководитель, инженер	3,8	5,624

6	Изучение полученных зависимостей	5	8	6,2	Научный руководитель, инженер	3,1	4,588
7	Составление плана экспериментов	2	4	2,8	Научный руководитель, инженер	1,4	2,072
8	Подготовка стенда для экспериментальных работ	1	2	1,4	Инженер	1,4	2,072
9	Проведение эксперимента	6	12	8,4	Научный руководитель, инженер	4,2	6,216
10	Анализ и обработка полученных результатов	8	12	9,6	Инженер	9,6	14,208
11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	4	8	5,6	Инженер	5,6	8,288
12	Выделение основных закономерностей	3	5	3,8	Научный руководитель, инженер	1,9	2,812
13	Обсуждение и оценка эффективности результатов	3	5	3,8	Научный руководитель, инженер	1,9	2,812
14	Составление пояснительной записки	7	14	9,8	Инженер	9,8	14,504
15	Подготовка к защите работы	7	14	9,8	Инженер	9,8	14,504
Итого		67	123	89,4		73,1	108,188

4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Научно-исследовательская работа проводится за персональным компьютером и не требует материальных ресурсов. Затраты по этому разделу равны нулю

4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры и т.п.), необходимого для проведения работ. Однако, при выполнении данного исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ. Поэтому необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования.

Расчет амортизации производился следующим образом:

$$H_a = \frac{1}{n}, \quad (47)$$

где n – срок полезного использования (СПИ) в количестве лет.

Ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_M = \frac{H_a \cdot И}{12}, \quad (48)$$

где $И$ – первоначальная стоимость оборудования (ПСО), тыс.руб.

Таблица 13 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, Р	Общая стоимость оборудования, Р
1.	Лицензия среды программирования	1	26601/год (326\$) [23]	26601/год (326\$)
2.	Процессор	1	22499 [24]	22499
3.	Графическая карта	1	28999 [25]	28999
4.	Монитор	1	9999 [26]	9999
5.	Материнская плата	1	9499 [27]	9499
6.	Оперативная память	1	5299 [28]	5299
7.	SSD M2	1	9699 [29]	9699
8.	Блок питания	1	9599 [30]	9599
Общая стоимость оборудования				122194
Затраты на доставка и монтаж				18329
Итого:				140523

Таблица 14 – Амортизационные отчисления

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	СПИ	ПСО, руб.	Норма амортизации	Ежемесячные отчисления, руб.
1	Лицензия среды программирования	1	5	26601/год (326\$)	0,20	443,35
2	Процессор	1	5	22499	0,20	374,9833
3	Графическая карта	1	5	28999	0,20	483,3167
4	Монитор	1	5	9999	0,20	166,65
5	Материнская плата	1	5	9499	0,20	158,3167
6	Оперативная память	1	5	5299	0,20	88,31667
7	SSD M2	1	5	9699	0,20	161,65
8.	Блок питания	1	5	9599	0,20	159,9833

Итого по статье	2036,567
-----------------	----------

Таким образом, амортизационные затраты на специальное оборудование в ходе научного исследования в сумме на специальное оборудование составили 2037 рублей. Первоначальная стоимость всего оборудования составила 122194 рублей.

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	265
Календарное число нерабочих дней		
выходные дни	52	82
праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
Отпуск	45	52
невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	217

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (49)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{осн}$).

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (50)$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (51)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 24 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя); F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (52)$$

где $Z_{мс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3; k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5; k_p – районный коэффициент, равный 1,3

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 16

Руководителем в данном случае выступает Евдокимов К.Е. доцент, к.ф.-м.н, оклад которого составляет 37700, оклад инженера примем равным 13900. Премииальные коэффициент и коэффициент доплат учитывать не будем.

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{мс}$	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{зн}$, руб.
Руководитель	37700	-	-	1,3	49010	2007	45	90315	10837,8	101152,8
Инженер	13900	-	-	1,3	18070	866	102	88332	10599,84	98931,84
Итого по статье								178647	21437,6	200084,64

4.3.4 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.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} \quad (53)$$

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

Результаты расчета представлены в таблице 16.

4.3.5 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:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (54)$$

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

Отчисления на социальные нужды (30% от статьи заработной платы) составили 60025 руб.

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов

исследования, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{Заработная плата исполнителей}), \quad (55)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов возьмём в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (70464 + 109200 + 178647 + 21437,6 + 60025) = 70364 \text{ руб.} \quad (56)$$

4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	-
Стоимость оборудования	122194
Амортизационные отчисления	2037
Затраты на основную заработную плату	178 647
Затраты на дополнительную заработную плату	21 438
Страховые отчисления	60 025
Накладные расходы	70 364
Бюджет затрат НИИ	454705

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения. Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (57)$$

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

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги программ моделирования физических явлений: COMSOL ($\Phi_{p1}=629685$), Elcut ($\Phi_{p2}=470000$), Wolfram Mathematica ($\Phi_{p3}=454705$).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{629685}{629685} = 1 \quad (58)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{470000}{629685} = 0,75 \quad (59)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{454705}{629685} = 0,72 \quad (60)$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

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

$$I_{pi} = \Sigma a_i \cdot b_i, \quad (61)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Далее в таблице 18 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта, где аналог 1 – программа моделирования физических задач COMSOL, аналог 2 – Elcut.

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Качество интеллектуального интерфейса	0,1	5	4	3
2. Точность	0,25	5	3	2
3. Унифицированность	0,2	3	3	2
4. Потребность в ресурсах памяти	0,2	3	3	2
5. Простота эксплуатации	0,1	4	4	4
6. Функциональная мощность	0,15	1	4	3
Итого	1	21	22	16

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,1 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 1 = 3,5 \quad (62)$$

$$I_{p2} = 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,35 \quad (63)$$

$$I_{p3} = 0,1 \cdot 3 + 0,25 \cdot 2 + 0,2 \cdot 2 + 0,2 \cdot 2 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 = 2,45 \quad (64)$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{фин}^p$) и аналога ($I_{фин}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{фин}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi 1}^p} = \frac{3,5}{1} = 4,85 \quad (65)$$

$$I_{\text{фин}}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\phi 2}^p} = \frac{3,35}{0,75} = 3,35 \quad (66)$$

$$I_{\text{фин}}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_{\phi 3}^p} = \frac{2,45}{0,72} = 3,28 \quad (67)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{фин}}^p}{I_{\text{фин}}^{ai}}, \quad (68)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта; $I_{\text{фин}}^p$ – интегральный показатель разработки; $I_{\text{фин}}^{ai}$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В таблице 19 представлена сравнительная эффективность разработки, где аналог 1 – программа моделирования физических задач COMSOL, аналог 2 – Elcut.

Таблица 19 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,72	1	0,75
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,5	3,35	2,45
3	Интегральный показатель эффективности	4,85	3,35	3,28
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,45	1,48

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения, поставленного в данной технической задаче с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Данный анализ подтвердил конкурентоспособность применения Wolfram Mathematica для моделирования магнитного поля планарного магнетрона.

2. Проведен SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Анализ показал, что потенциальных сильных сторон у проекта больше, чем слабых, что доказывает перспективность разработок проекта.

3. Установлено, что в календарных днях длительность работ для научного руководителя составило 45 дней, а для инженера 102 дней. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, по которому можно увидеть, что самые продолжительные по времени работы – подготовка образцов, осаждение покрытий и проведение испытаний образцов.

4. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 454705 рублей;

5. Определены показатели ресурсоэффективности, интегральный финансовый показатель, интегральный показатель эффективности и сравнительная эффективность вариантов исполнения, значения которых свидетельствуют о достаточно высокой эффективности реализации технического проекта.

5 Социальная ответственность

Введение

В данном разделе будут рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением нормативных условий труда, а конкретнее: санитарно-гигиенических условий, пожарной безопасности, а также защиты от опасных производственных факторов. Важным условием является согласование данных действий с нормативными документами, действующими на территории Российской Федерации.

В данной работе рассматривается подход моделирования магнитной подсистемы планарного магнетрона. Вся работа выполняется с использованием пакета Wolfram Mathematica, который установлен на персональный компьютер. Следовательно, в роли рабочего места выступает помещение, оборудованное электронно-вычислительной машиной. Также будут рассмотрены требования и рекомендации, способствующие минимизации вредных и опасных факторов, связанных с работой в таких помещениях.

Исследовательская деятельность проводилась в аудитории 222 11 корпуса ТПУ, габаритные размеры которой 4,65×6,3 м и в высоту 3 м.

5.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Для идентификации потенциальных факторов был использован [36]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для рабочей зоны аудитории 222 11 корпуса ТПУ и соответствующие им нормативные документы представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
Вредные	Опасные	
Отклонение показателей микроклимата	-	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [36].
Повышенный уровень шума	-	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [36]
Физические перегрузки	-	ГОСТ 12.2.032–78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [38]
Нервнопсихические перегрузки	-	ГОСТ Р 50948-01. “Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности” [39]
Электромагнитное излучение	-	ГОСТ Р 50948-01. “Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности” [39]

Недостаточная освещенность рабочего места	-	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [40]
-	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [41]
-	Возгорание	СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок во взрывопожарной и пожарной опасности [42] СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования [43]

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

- Физические: температура и влажность воздуха, статическое электричество, электромагнитное излучение, освещенность, шум;
- Психофизиологические: физические статические перегрузки и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.1.1 Микроклимат

Микроклиматом производственных помещений называют метеорологические условия внутри помещений. Эти условия определяются факторами, действующими на организм человека: температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочем месте в аудитории 222 11 корпуса ТПУ [36].

При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечнососудистой системы человека.

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [36]

Период года		Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Оптимальные параметры	22-24	40-60	0,1
	Допустимые параметры	20-22/24-25	15-40/60-75	0,1
Тёплый	Оптимальные параметры	23-25	40	0,1
	Допустимые параметры	21-23,25-28	15-40/40-75	0,1

Допустимые микроклиматические отклонения не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

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 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция [44].

Расчет вентиляции в аудитории

Согласно [44] кратность воздухообмена аудитории, учебных кабинетов, лабораторий равна 2 с⁻¹ в 1 час, при условии минимального расхода наружного воздуха на 1 человека не менее 20 м³/ч.

Расчетная формула имеет вид:

$$L = k \cdot V, \quad (69)$$

где L – расход воздуха м³/ч, k – кратность воздухообмена ч⁻¹, V – объем помещения м³.

Объем аудитории рассчитывается:

$$V = 6,3 \cdot 4,65 \cdot 3 = 87,9 \text{ м}^3. \quad (70)$$

Таким образом, расход воздуха будет равен:

$$L = 2 \cdot 87,9 = 175,8 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (71)$$

Такой воздухообмен может обеспечиваться вентилятором CV 200 ERA PRO, обладающим производительностью 350 м³/ч [45].

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 аудитории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность^о – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом^о – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С.

5.1.2 Повышенный уровень шума

Повышенный уровень шума ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, в частности, на органы слуха. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне в аудитории 222 11 корпуса ТПУ.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, утверждённых [37].

В таблице 22 представлены предельно допустимые уровни звукового давления для лаборатории с шумным оборудованием.

Таблица 22 – Предельно допустимые уровни звукового давления для аудитории образовательной организации [37]

Рабочее место	Частота, Гц									Уровень звука, дБА
	Уровень звукового давления, дБ									
Аудитория образовательной организации	31	65	125	250	500	1000	2000	4000	8000	40
	79	63	52	45	39	35	32	30	28	

Предельно допустимым уровнем звука от непостоянных источников шума является 55 дБА [37]. Оборудование, установленное на рабочем месте, а именно персональный компьютер, производит шум в значениях 35-50 дБА.

5.1.3 Физические и нервно-психологические перегрузки

При работе с персональным компьютером, оператор находится в сидячем положении в течение длительного времени, испытывая статическую физическую нагрузку на спину и шейный отдел позвоночника. Кроме того, работая за

персональным компьютером, человек постоянно получает информационные сигналы от компьютера, что приводит к нервнопсихологическим перегрузкам.

Длительные нервно-психологические перегрузки приводят к снижению работоспособности, угнетению центральной нервной системы, психическим расстройствам.

Для избежания перегрузок, следует делать перерывы в работе. Также рекомендуется соблюдать нормы планировки рабочего места в аудитории 222 11 корпуса ТПУ [38].

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 31.

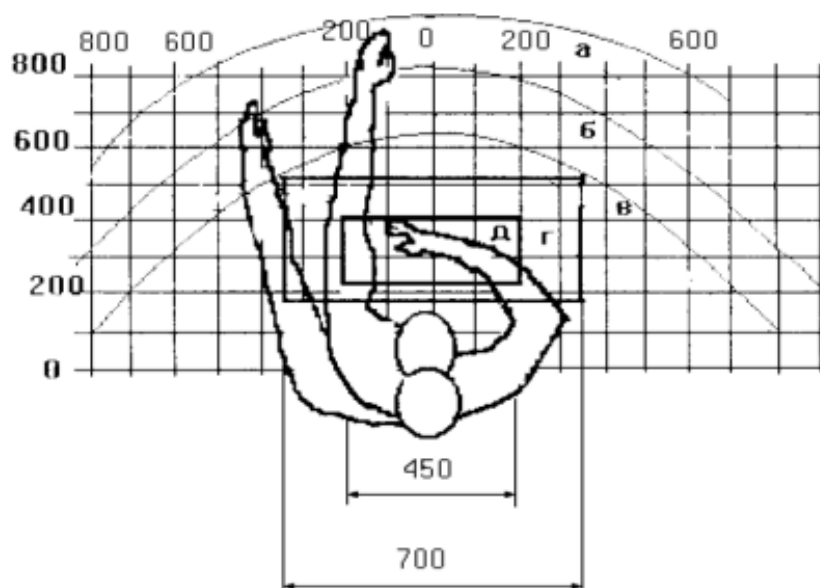


Рисунок 26 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук, б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке, в – зона легкой досягаемости ладони, г – оптимальное пространство для грубой ручной работы, д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- Дисплей размещается в зоне а (в центре);
- Клавиатура – в зонах г/д;
- Системный блок размещается в зоне б (слева);
- Принтер находится в зоне а (справа);
- Документация, необходимая при работе размещается в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева);
- Литература, не используемая постоянно – в выдвижных ящиках стола [38].

При проектировании письменного стола должен быть учтен ряд требований.

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 [38].

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

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 ° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 °. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [38].

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 [38].

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 [39].

На рабочем месте, аудитории 222 11 корпуса ТПУ, данные требования [38] соблюдены.

5.1.4 Электромагнитное излучение

При работе с компьютером источником электромагнитного излучения является дисплей. Электромагнитные волны приводят к неблагоприятным изменениям в организме, сопровождающиеся [46]:

- угнетением центральной нервной системы (замедление реакции, ухудшение памяти, депрессии разной тяжести, повышенная возбудимость, раздражительность, нарушения сна, бессонница, резкие перепады настроения, головокружения, слабость);
- изменениями в сердечно-сосудистой системе (снижение ЧСС, изменения на ЭКГ, артериального давления);

- нарушение морфологического состава крови (уменьшение количества лейкоцитов, ретикулоцитов, ацидофильных гранулоцитов), что сопровождается нарушениями функционального состояния эндокринной системы, обменных процессов, дистрофическими процессами в тканях мозга, печени, селезенки, яичках.

Плотность магнитного потока должна быть не более [39]:

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

5.1.5 Освещенность

Данный вредный фактор возникает при неправильном комбинировании света в рабочем помещении. Недостаточная освещенность рабочей зоны в аудитории 222 11 корпуса ТПУ оказывает негативное воздействие на зрительную систему человека.

Предусмотрены следующие нормы освещения при работе с ПК [40]. Работа в компьютерных залах относится к классу зрительных работ А-2 – “очень высокой точности”. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть более 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещённость поверхности экрана не должна быть более 200 лк.

Соблюдение данных требований способствует установлению светового баланса в рабочем помещении и минимизирует его воздействие на зрительный аппарат.

Расчет освещённости

Для расчёта были выбраны светильники ЭРА SPO910340K070. Этот светильник обладает мощностью 70 Вт, длина светильника равна 595 мм, ширина – 595 мм, световой поток $\Phi_{\text{лд}}$ равен 7350 Лм [47].

Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Расчетная высота светильника над рабочей поверхностью h :

$$h = H - h_c = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ м}, \quad (72)$$

где H - высота расположения ламп над уровнем пола м, h_c - высота рабочей поверхности м.

Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{29,3}{2,2 \cdot (4,65 + 6,3)} \approx 1,25, \quad (73)$$

где S - площадь аудитории м^2 , A и B – линейные размеры аудитории м.

Коэффициенты отражения света от стен и потолка принимаются равными 70 и 50 % соответственно. В связи с этим, коэффициент использования светового потока η равен 0,51.

Необходимое число светильников N рассчитывается по следующей формуле:

$$N = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{\text{лд}} \cdot \eta} = \frac{500 \cdot 29,3 \cdot 1,5}{7350 \cdot 0,51} = 5,86 \approx 6 \text{ шт.} \quad (74)$$

Потребный световой поток группы светодиодных светильников определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{500 \cdot 29,3 \cdot 1,5}{6 \cdot 0,51} = 7900 \text{ Лм.} \quad (75)$$

Проверка удовлетворения условиям:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \leq 20\%. \quad (76)$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{7350 - 7900}{7350} \cdot 100\% = -7,48\%. \quad (77)$$

Освещение в аудитории 222 11 корпуса ТПУ соответствует установленным нормам [37].

5.1.6 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования [41].

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока.

Рабочее помещение, аудитория 222 11 корпуса ТПУ, относится к классу 1 “Помещения без повышенной опасности” [41] ввиду нормального микроклимата и малого количества токопроводящих поверхностей.

В помещении применяются следующие меры защиты [41] от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их изоляции.

5.1.7 Пожаровзрывобезопасность

Согласно [42], аудитория 222 11 корпуса ТПУ, оборудованное ЭВМ, относится к категории пожароопасности В4, т.е. к помещениям, в которых находятся (обрабатываются) горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть. Помещения категории В4 надлежит оборудовать системами автоматической противопожарной защиты, в соответствии с требованиями [43].

Причинами, которые могут вызывать пожар, являются [42]:

- Неисправность электропроводки и приборов;
- Короткое замыкание электрических цепей;
- Перегрев аппаратуры;
- Молния.

Для предотвращения возникновения возгорания следует придерживаться мер безопасности:

- В течение проведения работ содержать в порядке и чистоте рабочее место;
- Не закрывать вентиляционные отверстия ПЭВМ;
- Не допускать попадания влаги на поверхности устройств;
- Не переключать разъемы сетевых (220 В) кабелей;
- Не производить вскрытие ПЭВМ.

Меры по ликвидации возгорания описаны в разделе 5.2.

5.2 Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС)

В таблице 23 представлен перечень возможных чрезвычайных ситуаций, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС.

Таблица 23 – Чрезвычайные ситуации, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС

Чрезвычайная ситуация	Меры предотвращения ЧС	Меры по ликвидации последствий ЧС
Пожар	1. Использование только исправного оборудования 2. Проведение периодических	1. Прекратить работу 2. Отключить электрооборудование 3. Позвонить в подразделение

	<p>инструктажей по пожарной безопасности</p> <p>3. Отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала</p>	<p>пожарной охраны по телефону 01 или 112</p> <p>4. Сообщить о случившемся руководителю подразделения</p> <p>5. Приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения</p>
<p>Поражение электрическим током</p>	<p>1. Использование только исправного оборудования</p> <p>2. Недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения</p> <p>3. Проведение периодических инструктажей по электробезопасности</p>	<p>1. Освободить пострадавшего от воздействия электрического тока</p> <p>2. Проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь</p> <p>3. Позвонить в службу экстренного реагирования по телефону 112</p> <p>4. При необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение</p>

		5. О произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя подразделения
Травмирование в результате падения с высоты собственного роста	<p>1. Обеспечение порядка на рабочем месте</p> <p>2. Использование предупреждающих знаков при проведении уборки</p> <p>3. Проведение периодических инструктажей по технике безопасности</p>	<p>1. Проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь</p> <p>2. Позвонить в службу экстренного реагирования по телефону 112</p> <p>3. При необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение</p> <p>4. О произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя подразделения</p>

Выводы по главе 5

В данном разделе были рассмотрены следующие вредные и опасные факторы:

- Микроклимат [37];
- Шум [37];
- Физические и нервно-психологические перегрузки [38, 39];
- Влияние электромагнитных волн [39];
- Освещенность [40];
- Электробезопасность [41];
- Пожаровзрывобезопасность [42, 43].

На основании которых было вынесено суждение о том, что аудитория 222 11 корпуса ТПУ отнесена:

- По электробезопасности к классу 1 “Помещения без повышенной опасности” [41];
- По пожаровзрывоопасности к категории В4 [42].

Помимо этого, в разделе описан перечень возможных чрезвычайных ситуаций, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС.

Возможные чрезвычайные ситуации:

- Пожар;
- Поражение электрическим током;
- Травмирование в результате падения с высоты собственного роста.

Таким образом, в рабочем помещении возможно безопасное проведение исследовательской деятельности с минимум рисков, которые тоже были рассмотрены.

Заключение

В рамках данной работы был разработан расчетный модуль в Wolfram Mathematica для моделирования магнитного поля системы с материалами, имеющими нелинейные магнитные характеристики. В связи с тем, что используемая программа не обладает готовым интерфейсом для моделирования физических явлений необходимо проверить используемую математическую модель и допущения. Модуль был верифицирован на физических задачах, имеющих известное аналитическое решение. Во всех случаях полученные зависимости имеют отличное согласие с теоретическими выражениями в пределах используемых допущений.

Вместе с тем, была проведена оценка адекватности модели – выполнение эксперимента по измерению магнитного поля. В качестве объектов исследования были выбраны два типа магнетронов: симметричный и кусочный. Экспериментальные данные имеют хорошее согласие с численными решениями.

Помимо этого, для проверки используемой математической модели и допущений было проведено в готовом пакете Elcut. Результаты численного моделирования в разных пакетах оказались во многом схожи между собой при учете, что количество элементов сетки и её построения отличаются. Также отличия могли бы быть обусловлены методом аппроксимации магнитной проницаемости магнитомягких материалов (электротехническая сталь), но подтвердить это или опровергнуть невозможно, так как у пользователя нету доступа к методу реализации данной операции.

Кроме того, при численном моделировании магнитного поля были получены следующие результаты:

1. Для получения численных значений магнитной индукции близких к действительным необходимо, чтобы исследуемая область была много больше размеров объекта моделирования. Иначе это приведет к завышению величины магнитного поля системы;

2. Была разработана методика расчета магнитной системы, выполненной из отдельных магнитов;

3. Было дано качественное объяснение асимметричности экспериментальных данных для симметричного магнетрона с помощью численного моделирования.

Созданный модуль пригоден для моделирование не только магнитного поля, но и для всех физических явления, которые описываются уравнениями Пуассона или Лапласа. В дальнейшем планируется его использовать для моделирования тлеющего разряда в скрещенных магнитном и электрическом полях.

Список используемой литературы

1. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: учебное пособие – МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 54 с;
2. Сиделёв Д.В. Осаждение покрытий из хрома и никеля с помощью магнетронного диода с «горячей» мишенью: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07. / Д.В. Сиделёв. - Томск, 2018 - 138 с.;
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. Пособие: Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество. – 4-у изд., стереот. – М.: ФИЗМАЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с;
4. Как B-H кривая влияет на расчёт магнитных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/how-the-b-h-curve-affects-a-magnetic-analysis-and-how-to-improve-it/>;
5. Fundamentals of Finite Element Analysis / Edited by: D. V. Hutton. – 1st ed. – New York: McGraw Hill, 2003. – 640 p;
6. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / С. В. Каменев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 110 с.;
7. Лекции по методу конечных элементов: Учебное пособие. - М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова (лицензия ИД N 05899 от 24.09.2001 г.); МАКС Пресс, 2010. - 2-е изд., испр. и доп. - 264 с,
8. Ю. А. Сагдеева, С. П. Копысов, А. К. Новиков. Введение в метод конечных элементов: метод. пособие. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет». 2011. 44 с;
9. Brunner D., Khawaja H., Moatamedi M., Boiger G. CFD modelling of pressure and shear rate in torsionally vibrating structures using ANSYS CFX and COMSOL Multiphysics // The International Journal of Multiphysics. – 2018. – Vol. 12. – No. 4.;

10. Achkar H., Pennec F., Peyrou D., Sartor M., Plana R., Pons P. Use the reverse engineering technique to link COMSOL and ANSYS softwares. // International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems – 2008. – 5 p.;
11. Georgescu A.-M., Georgescu S.-C., Bernad S., Coşoiu C. I., COMSOL Multiphysics versus Fluent: 2D numerical simulation of the stationary flow around a blade of the Achard turbine // International Conference on Energy and Environment. – 2007. – №4. – P.635-643.;
12. Salvi. D, Boldor D., Ortego J., Aita G. M., Sabliov C. M. Numerical Modeling of Continuous Flow Microwave Heating: A Critical Comparison of COMSOL and ANSYS // J. Microw. Power Electromagn. Energy. – 2010. – №44. – P.187-197.;
13. Печников В. С., Короченцев В. В., Доценко Е. В. Магнитное поле соленоида: учебное пособие – Дальневосточный федеральный университет. – Владивосток: Издательство Дальневосточный федеральный университет, 2014. – 11 с.;
14. Н. Н. Новиков, И. Е. Родионов, В. Ф. Шутько. Синхронные двигатели: справочник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 36 с.;
15. Касьяненко М. Г., Матюхов В. Ф., Ваганов М. А. Аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей при проектировании электрических машин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – №9. – С. 69-76;
16. Встроенный учебник/справочник Wolfram Mathematica [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://reference.wolfram.com/language/>, свободный. – Яз. Англ.;
17. Руководство пользователя Elcut (версия 5.4). Производственный кооператив TOP – г. Санкт-Петербург, 2006, 298 с.;
18. Юрьева А.В. Расчёт вакуумных систем: учебное пособие – Томский политехнический университет. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. – 114 с.;

19. Бате Н., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с;
20. Александр, Иванов Технология напыления тонких пленок / Иванов Александр [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russianelectronics.ru/tehnologiya-napyleniya-tonkih-plenok/> (дата обращения: 02.05.2023);
21. Капитализация ANSYS, Inc [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.calc.ru/ANSS-kapitalizaciya.html#3years> (дата обращения: 27.04.2023);
22. Как диаграммы Ганта упрощают работу с проектами [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/hygger/blog/415271/> (дата обращения: 27.04.2023);
23. Mathematica Pricing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wolfram.com/mathematica/pricing/industry/#individual> (дата обращения: 27.04.2023);
24. Процессор AMD Ryzen 7 3800X OEM. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dns-shop.ru/product/2426953d2777ed20/processor-amd-ryzen-7-3800x-oem/> (дата обращения: 27.04.2023);
25. Видеокарта MSI GeForce RTX 3050 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dns-shop.ru/product/29f6e4aa08c0ed20/videokarta-msi-geforce-rtx-3050-gaming-rtx-3050-gaming-8g/> (дата обращения: 02.05.2022);
26. 23.6" Монитор АОС 24В1Н черный [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dns-shop.ru/product/a03de8914a833330/236-monitor-aoc-24b1h-cernyj/> (дата обращения: 27.04.2023);
27. Материнская плата Материнская плата ASRock B550M Pro4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dns-shop.ru/product/01e7c5109bc91b80/materinskaa-plata-asrock-b550m-pro4/> (дата обращения: 27.04.2023);
28. Оперативная память ADATA XPG Spectrix D45G RGB 16 ГБ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dns->

shop.ru/product/85bf52a9e9fbd763/operativnaa-pamat-adata-xpg-spectrix-d45g-rgb-ax4u41338g19j-dcbkd45g-16-gb/ (дата обращения: 27.04.2023);

29. 1000 ГБ SSD M.2 накопитель MSI SPATIUM M470 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dns-shop.ru/product/2b40dd511c0aed20/1000-gb-ssd-m2-nakopitel-msi-spatium-m470-s78-440l420-p83/> (дата обращения: 27.04.2023);

30. Блок питания DEERCOOL DQ750 [DQ750-M-V2L] [750 Вт, 80+ Gold, EPS12V, APFC, 20 + 4 pin, 4+4 pin x2 CPU, 8 SATA, 6+2 pin x4 PCI-E [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dns-shop.ru/product/8f5a386d885f3332/blok-pitania-deercool-dq750-dq750-m-v2l/> (дата обращения: 27.04.2023);

31. Производственный календарь на 2023 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.consultant.ru/law/ref/calendar/proizvodstvennye/2023/> (дата обращения: 27.04.2023);

32. Оклады в ТПУ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://hr.tpu.ru/vacancies/>;

33. Тарифы. — Текст: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://net.tpu.ru/> (дата обращения: 02.05.2022);

34. Кадровая политика . — Текст: электронный // РФЯЦ – ВНИИЭФ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vniief.ru/carier/cpolit/stuff/> (дата обращения: 02.05.2022);

35. Меньшикова, Е. В. Курсовая работа / Е. В. Меньшикова. — Томск: ТПУ, . — 25 с;

36. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация;

37. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания;

38. ГОСТ 12.2.032–78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования;

39. ГОСТ Р 50948-01. “Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности”;
40. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95;
41. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;
42. СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок во взрывопожарной и пожарной опасности;
43. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования;
44. СП 118.13330.2012. Свод правил. Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06- 2009;
45. Эра Storm YWF2E 200 ВВ Осевой вентилятор низкого давления [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vent-era.ru/kommercheskiy-ventilyator-cv-200-era-pro/> (Дата обращения: 31.05.2023);
46. Одинаев Ф. И. и др. Электромагнитные излучения и здоровье человека //Вестник российских университетов. Математика. – 2015. – Т. 20. – №. 6. – С. 1714-1717. 107;
47. Светодиодная панель ЭРА SPO910340K070 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.vseinstrumenti.ru/electrika-isvet/svetilniki/paneli/era/spo910340k070-70vt-4000k-7350lm-ip40-595x595x40-matovuyj-b0051551/> (Дата обращения: 07.05.2023);
48. ГОСТ 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения;