

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики (ОЭФ)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Применение численного моделирования для определения параметров высокоинтенсивных пучков ионов и расчета температурных полей в мишенях под их воздействием

УДК 621.384.665:621.384.664:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Мурзарахимов Руслан Рустамович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник НЛ ВИИ ИШФВП	Иванова Анна Ивановна	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Л.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Склярова Е.А.	к.п.н., доцент		

Запланированные результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП
P1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности
P2	Уметь работать в коллективе, быть готовым к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.
P3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.
P4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.
P5	Применять организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.
P6	Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.
P7	Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.
P8	Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики (ОЭФ)

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Склярова Е. А.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Мурзарахимову Руслану Рустамовичу

Тема работы:

Применение численного моделирования для определения параметров высокоинтенсивных пучков ионов и расчета температурных полей в мишенях под их воздействием	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	21.05.2021 г., №141-54/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

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 являются высокоинтенсивные ионные пучки азота и их влияние</p> <p>Целью работы является определение параметров высокоинтенсивных пучков ионов азота и расчета температурных полей в мишенях из Ti и Al под их воздействием.</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>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Обзор литературы; 2) Составление файлов данных для моделирования; 3) Определение параметров высокоинтенсивных пучков ионов азота на основании экспериментальных данных; 4) Расчет температурных полей в образцах из Ti и Al на основании полученных результатов; 5) Расчет температурных полей внутри образцов из Ti и Al при использовании в качестве теплоотвода различных охлаждающих веществ; 6) Анализ результатов и выводы; 7) Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 8) Социальная ответственность; 9) Заключение.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Спицына Л.Ю., Доцент ОСГН ШБИП</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Мезенцева И.Л., Ассистент ООД</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Младший научный сотрудник НЛ ВИИ ИШФВП</p>	<p>Иванова Анна Ивановна</p>	<p>к.ф.-м.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>0Б71</p>	<p>Мурзарахимов Руслан Рустамович</p>		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Мурзарахимову Руслану Рустамовичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 Физика

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): <i>материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– Материальные затраты – 1055 руб. – Зарботная плата – 23755 руб. – Отчисления во внебюджетные фонды – 7127 руб. – Накладные расходы – 5360 руб. – Бюджет затрат НИИ – 38858 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	– Амортизационные отчисления – 1561 руб.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Описание рынка и потребителей Расчет конкурентоспособности; SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Мурзарахимов Руслан Рустамович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Мурзарахимову Руслану Рустамовичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 Физика

Тема ВКР:

Применение численного моделирования для определения параметров высокоинтенсивных пучков ионов и расчета температурных полей в мишенях под их воздействием

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: профили распыления мишеней Рабочая зона: рабочая поверхность с ПЭВМ. Область применения: Теоретические расчеты
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (<u>ред. от 30.04.2021</u>)</p> <p>- ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.»</p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Отклонение показателей микроклимата; – Превышение уровня шума; – Отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения; <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Электромагнитное излучение; – Повышенное значение напряжения в электрической цепи.
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	Литосфера: Токсичное сырье, используемое в сборке компьютеров.
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p>	Возможные ЧС: Сильные морозы, Пожары, Несанкционированное проникновение; Наиболее типичная ЧС: Пожар.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Мурзарахимов Руслан Рустамович		

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Уровень образования Бакалавр
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики (ОЭФ)
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.02.2021	Аналитический обзор литературы	10
20.03.2021	Объект и методы исследования; Расчеты и аналитика	40
05.04.2021	Результаты проведенного исследования	30
20.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
25.05.2021	Социальная ответственность	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник НЛ ВИИ ИШФВП	Иванова Анна Ивановна	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Склярова Елена Александровна	к.п.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 86 страницы, 29 рисунков, 27 таблиц, 36 литературных источников, 0 приложений.

Ключевые слова: высокоинтенсивная ионная имплантация, температурные градиенты, распределение плотности тока, ионные пучки, сферическая фокусировка пучка.

Объектом исследования являются высокоинтенсивные ионные пучки азота и их влияние на материалы.

Целью работы: Определение параметров высокоинтенсивных пучков ионов азота и расчета температурных полей в мишенях из Ti и Al под их воздействием. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Развитие методики расчета плотности тока в условиях сферической фокусировки пучка.
2. Получение распределения плотности тока сфокусированного пучка ионов азота при разных тепловых режимах.
3. Расчет температурных полей в образцах из Ti и Al на основании полученных результатов.
4. Расчет температурных полей внутри образцов из Ti и Al при использовании в качестве теплоотвода различных охлаждающих веществ.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	12
1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА.....	14
1.1. Принцип формирования высокоинтенсивных пучков заряженных частиц	14
1.2. Особенности формирования и измерения высокоинтенсивных импульсно-периодических пучков ионов.....	17
2. РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	21
2.1. Получение профилей образцов с помощью профилометра «Micro Measure 3D Station».....	21
2.2. Обработка профилей в программной среде «Pioneer».....	22
2.3. Развитие методики расчета плотности тока в условиях сферической фокусировки пучка.....	27
2.4. Расчет плотности тока сфокусированного пучка	31
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МИШЕНЯХ В УСЛОВИЯХ ИХ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ.....	33
3.1. Распределение температурных полей в образцах из Al и Ti при облучении пучком ионов азота	33
3.1.1. Моделирование температурных полей в мишенях из Ti	35
3.1.2. Моделирование температурных полей в мишенях из Al.....	38

3.2. Исследование влияния температурных полей внутри образцов из Ti и Al при использовании в качестве теплоотвода различных охлаждающих веществ.....	41
3.2.1. Моделирование температурных полей внутри образца из Ti	43
3.2.2. Моделирование температурных полей внутри образца из Al.....	45
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	48
4.1. Введение для раздела.....	48
4.2. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	48
4.2.1. Потенциальные потребители результатов исследования	48
4.2.2. Анализ конкурентных технических решений.....	50
4.2.3. SWOT-анализ.....	51
4.3. Планирование научно-исследовательских работ.....	53
4.3.1. Структура работ в рамках научного исследования	53
4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	54
4.3.3. Бюджет научно-технического исследования	57
4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	62
4.5. Выводы по разделу.....	65
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	67
5.1. Введение для раздела.....	67
5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	67
5.2.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.	67

5.2.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.	68
5.3. Производственная безопасность.	68
5.4. Экологическая безопасность.....	76
5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	77
5.6. Выводы по разделу.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	83

ВВЕДЕНИЕ

Ионная имплантация как метод модификации поверхностных и приповерхностных свойств материалов обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами [1-5].

Первоначально исследования по ионной имплантации проводились при плотностях ионного тока, не превышающих десятков и, лишь иногда, сотен микроампер на квадратный сантиметр. При этом для направленного изменения свойств полупроводников требовались малые флюенсы облучения, обычно не превышающие 10^{14} ион/см². В исследованиях по модификации микроструктуры и свойств металлов и сплавов оказались необходимы флюенсы ионного облучения на несколько порядков большие (до 10^{18} ион/см²), что потребовало разработки и применения более сильноточных источников ионов с плотностями ионного тока до нескольких миллиампер на квадратный сантиметр [6–9].

В последнее время получает развитие высокоинтенсивная имплантация ионов низкой энергии с плотностями ионного тока, достигающими несколько сотен миллиампер на квадратный сантиметр [10–14]. Особенность высокоинтенсивной имплантации обусловлена значительными энергетическими характеристиками ионного пучка. При амплитуде потенциала смещения 1.2 кВ импульсная плотность мощности ионного пучка будет достигать 0.3 кВт/см² [15]. Ежесекундно в приповерхностный слой материала вводится плотность энергии около 150 Дж/см². Такие плотности мощности и энергии ионного пучка способствуют быстрому разогреву и повышению температуры облучаемой мишени. Причем, если мишень теплоизолированная, то ее температура увеличивается очень быстро, но градиент температуры по глубине, от которого зависит и скорость диффузии уменьшается.

При установке мишени на массивном держателе скорость нагрева мишени ионным пучком снижается из-за теплопередачи от мишени в держатель, но при этом поддерживается значительный градиент температуры по глубине мишени, а в случае неоднородной плотности ионного тока и по поверхности образца. Поскольку температура образца, градиент температуры по поверхности

и глубине мишени во многом определяют формирование концентрационных профилей распределения имплантируемой примеси, микроструктуру, а зачастую и свойства материалов, важно разработать методику измерения и расчета этих параметров и верифицировать ее на основе сравнения с различными методами экспериментальной диагностики.

Целью работы является определение параметров высокоинтенсивных пучков ионов азота и расчета температурных полей в мишенях из Ti и Al под их воздействием. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Развитие методики расчета плотности тока в условиях сферической фокусировки пучка.
2. Получение распределения плотности тока сфокусированного пучка ионов азота при разных тепловых режимах.
3. Расчет температурных полей в образцах из Ti и Al на основании полученных результатов.
4. Расчет температурных полей внутри образцов из Ti и Al при использовании в качестве теплоотвода различных охлаждающих веществ.

1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА.

1.1. Принцип формирования высокоинтенсивных пучков заряженных частиц

Основной принцип формирования высокоинтенсивных пучков ионов впервые был сформирован коллективом Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов Томского политехнического университета, который описан в работе [15]. В данной статье представлен метод, совмещающий традиционную лучевую и плазменно-иммерсионную имплантации. Система формирования пучка основана на плазменно-иммерсионном извлечении ионов из плазмы, с применением баллистической фокусировки в эквипотенциальном пространстве дрейфа, предварительно заполненном плазмой.

Основные элементы системы формирования пучков: цилиндрический электрод, образец, дисковый экран, сеточный электрод, система формирования высокочастотных короткоимпульсных потенциалов смещения отрицательной полярности. Схема системы формирования ионных пучков представлена на рисунке 1.1.

Форма невырожденной поверхности второго порядка с центральной симметрией сеточного электрода обуславливает баллистическую фокусировку потока перпендикулярно ускоренных относительно поверхности сеточного электрода частиц, в фокус. Фокус располагается в геометрическом центре сферы и направлен на образец. Конструкция из сплошного металлического цилиндрического электрода и сеточного электрода создает объем, ограничивающий эквипотенциальное пространство для транспортировки ионного пучка. С противоположной стороны от сеточного электрода располагается образец и датчики. Импульсный потенциал смещения, прикладываемый одновременно к образцу, сплошному цилиндрическому и

сеточному электродам, обеспечивает ускорение и транспортировку в эквипотенциальном пространстве дрейфа ионов.

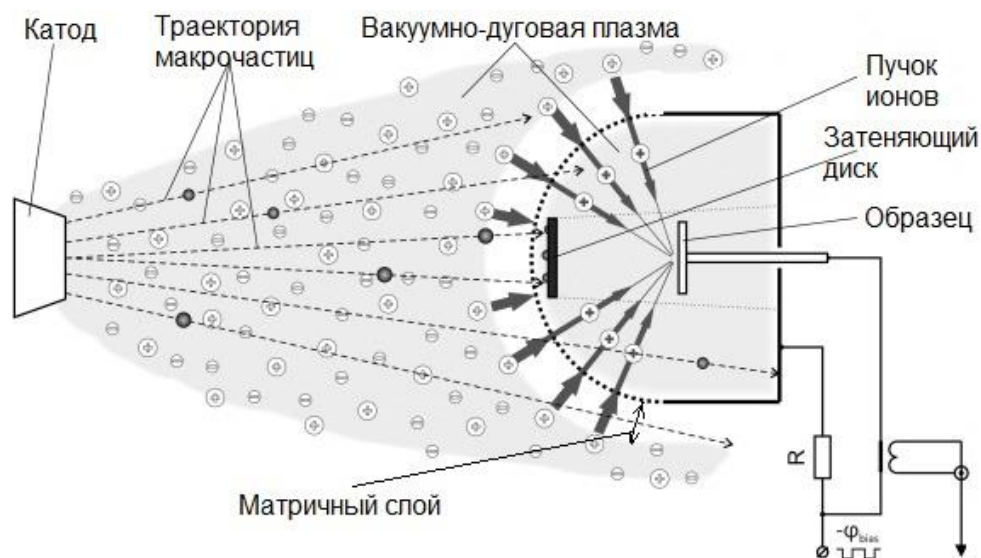


Рисунок 1.1 – Схема формирования высокоинтенсивных пучков ионов низких энергий [15]

Для формирования плазмы использовался вакуумно-дуговой разряд. Недостатком данного способа формирования плазмы является образование значительного потока макрочастиц, которые являются продуктами эрозии катода [16], размерами от долей микрометров до десятков микрометров, вследствие взрывных эмиссионных процессов на титановом катоде. Макрочастицы загрязняют обрабатываемые поверхности, что приводит к снижению технологических возможностей системы формирования ионных пучков. Чтобы нивелировать попадание макрочастиц на обработанную ионным пучком поверхность область подложки, в работе [15] был применен эффект «солнечного затмения» в области фокусировки, представляющий собой металлический экран, препятствующий осаждению макрочастиц вакуумной дуги. Металлический экран (затеняющий диск) установлен на сеточном электроде вдоль оси источника плазмы (Рисунок 1.1). Эмитируемые с катода макрочастицы в область образца, с практически прямолинейными траекториями движения, задерживаются данным экраном. В то время как ионы пучка, благодаря баллистической фокусировке сферического сеточного электрода,

беспрепятственно достигают облучаемой области мишени на коллекторе по прямолинейным траекториям. Результаты экспериментов, представленных в работе, доказали отсутствие макрочастиц на поверхности подложки в области следа ионного пучка при использовании эффекта «солнечного затмения». Рисунок 1.2 демонстрирует накопление макрочастиц на поверхности мишени вблизи фокальной плоскости системы, как с эффектом «солнечного затмения», так и без него.

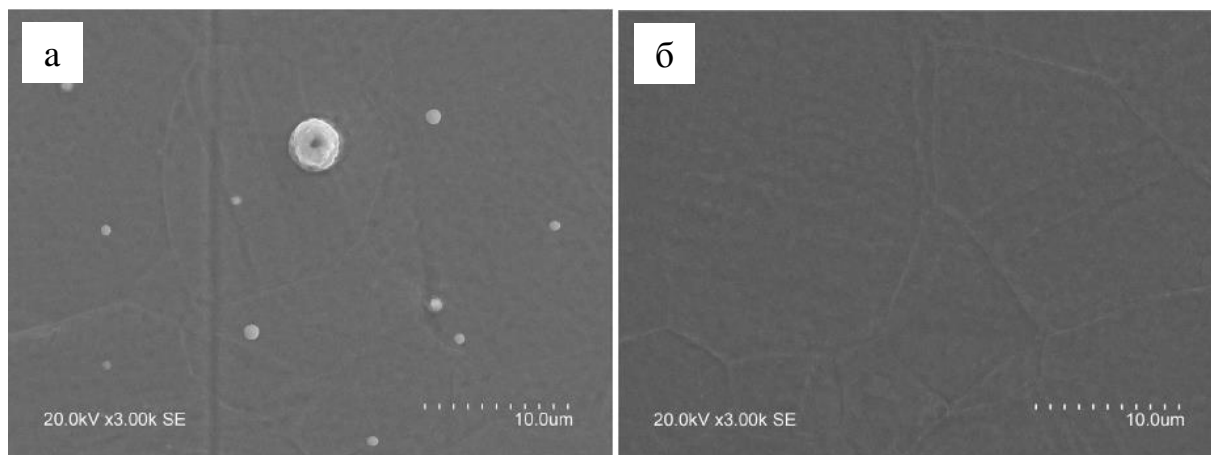


Рисунок 1.2 - СЭМ-изображения поверхности мишени после воздействия ионного пучка (а) без и (б) с системой разделения макрочастиц [15]

Проведенные серии экспериментов выявляли особенности формирования высокоинтенсивных пучков ионов титана в зависимости от: радиуса сеточного электрода, расстояния от мишени до сеточного электрода (область дрейфа пучка), амплитуды потенциалов смещения и продолжительности импульса потенциалов смещения на сеточный электрод. Результаты экспериментов показали, что лучшие условия для формирования ионного пучка достигнуты при расположении коллектора в фокусе системы, с максимальной амплитудой тока при максимальном ускоряющем напряжении, приложенном на сеточный электрод.

Также данная работа продемонстрировала возможность формирования пучков ионов титана низкой энергии, при высокой плотности тока до 1 А/см^2 . При изменении радиуса сеточного электрода от 7.5 до 10.5 см зафиксировано уменьшение амплитуды ионного тока в зависимости от продолжительности

импульсов потенциала смещения. Это также обусловлено ухудшением эффективности транспортировки пучка в пространстве дрейфа при больших расстояниях.

В работе [17] по низкоэнергетической высокоинтенсивной имплантации ионов алюминия в никель, благодаря плазменной иммерсионной экстракции, в сочетании с дальнейшей баллистической фокусировкой ионов, периодические пучки с максимальной плотностью 15 мА/см^2 не содержали макрочастиц. Это говорит о том, что добиться отсутствия макрочастиц можно при помощи фокусировки пучка.

1.2. Особенности формирования и измерения высокоинтенсивных импульсно-периодических пучков ионов

Импульсно-периодическое плазменно-иммерсионное формирование пучков ионов в сочетании с баллистической фокусировкой для достижения высоких плотностей ионного тока при относительно низких ускоряющих напряжениях обладает рядом специфических особенностей, создающих проблемы как для точного измерения параметров самого ионного пучка, так и для точного определения, например, температурных полей в мишени, существенно влияющих на процессы массопереноса, изменение микроструктуры и свойств ионно-модифицированных слоев различных материалов.

Рассмотрим последовательно различные факторы, влияющие на точность измерения основных характеристик ионного пучка и облучаемой мишени. Прежде всего на формирование ионного пучка влияет наличие экстрагирующей ионы мелкоструктурной сетки [15]. Плазменно-иммерсионное формирование ионного пучка предполагает погружение в плазму систему, включающую экстрагирующий электрод и электрод, формирующий пространство дрейфа, с подачей на них импульсно-периодического потенциала смещения отрицательной полярности. Распределение электрического поля в слое разделения зарядов вблизи сеточного электрода, погруженного в плазму, зависит

от плотности плазмы, амплитуды отрицательного потенциала смещения и характерных размеров ячеек сеточного электрода.

На параметры ионного пучка, формируемого в импульсно-периодическом режиме, существенно влияет динамика формирования слоя разделения заряда. При подаче потенциала смещения на сеточный электрод, вблизи последнего, благодаря быстрому уходу плазменных электронов, формируется, так называемый «матричный слой», в котором ионы по ширине слоя распределены равномерно. В электрическом поле слоя разделения зарядов начинается ускорение ионов. В исходном состоянии ионы находятся в различных местах слоя и, ускоряясь до сетки, получают различное приращение энергии. По мере ускорения ионов происходит и перераспределение плотности ионов в слое и, как результат, увеличивается ширина слоя. Динамическое изменение характеристик слоя разделения зарядов приводит к формированию, в течение некоторого времени, ионного пучка со значительным энергетическим разбросом. Стабилизация энергетического состава пучка достигается после расширения слоя до размеров, определяемых законом Чайлда-Ленгмюра [18]. По данным экспериментальных исследований время стабилизации плазменной ионно-иммерсионной границы может составлять несколько сотен наносекунд [19].

При малых амплитудах потенциала смещения, менее киловольта, ширина слоя разделения заряда в плазме, вблизи сеточного электрода оказывается сравнима с размером ячейки сетки. Это приводит к тому, что эмиссионная граница плазмы перестает быть плоской (в приближении плоской системы формирования пучка) и, с одной стороны, возрастают потери ионов из-за их попадания на сетку, а во-вторых, возрастает угловая расходимость ионного потока, что ухудшает условия баллистической фокусировки ионного пучка. Таким образом, формирование высокоинтенсивных пучков ионов при низких потенциалах смещения становится проблематичным.

Учитывая ограничения в снижении энергии ионов следует иметь в виду, что при высокоинтенсивной имплантации с плотностями ионного тока в десятки

и сотни миллиампер на квадратный сантиметр флюенсы ионного облучения, определяемые как

$$F = j_i f \tau / Ze, \quad (1.1)$$

где j_i – плотность ионного тока, f – частота импульсов, τ – длительность импульсов, Z – среднее зарядовое состояние ионов, e – элементарный заряд, t – время ионного облучения, будут очень значительными. Например, при плотности ионного тока 0.25 А/см^2 , коэффициенте заполнения импульсов потенциала смещения 0.5 и облучении мишени в течение часа флюенс ионного облучения составит $2.25 \cdot 10^{21}$ ион/см². Такие сверхвысокие флюенсы будут приводить к значительному ионному распылению поверхности облучаемой мишени. Ионное распыление поверхности приносит два негативных момента. При сверхвысоких флюенсах облучения толщины поверхностного распыленного слоя мишени достигают нескольких сотен микрометров. Это существенно изменяет морфологию поверхности [13]. Кроме того, распыление поверхностного слоя мишени сопровождается распылением ранее имплантированной примеси. Так, например, в работе [13] в результате высокоинтенсивной имплантации ионов азота в сталь 40Х13 в течение одного часа имплантированная примесь обнаруживалась на глубинах, превышающих 90 мкм. В тоже время глубина распыленного слоя достигала 180 мкм. Таким образом, общая глубина радиационно-стимулированной диффузии атомов азота превышала 270 мкм. Это означает, что можно надеяться на формирование более широких ионно-легированных слоев при высокоинтенсивной имплантации ионов с энергиями, обеспечивающими незначительное распыление поверхности.

На характеристики тока ионного пучка значительное влияние оказывают динамически изменяющиеся условия нейтрализации пространственного заряда пучка при его транспортировке в первоначально эквипотенциальном пространстве. Условия нейтрализации, в свою очередь, зависят от предварительного заполнения плазмой пространства дрейфа, возможности наработки газоразрядной плазмы, степени сжатия ионного пучка в процессе баллистической фокусировки [18].

Проявление еще одной особенности зависит от длительности импульсов потенциала смещения и его амплитуды. Как показано в работе [20], при длительностях импульсов потенциала смещения в несколько десятков микросекунд возможно появления эффекта срыва транспортировки высокоинтенсивного ионного пучка из-за проблем декомпенсации пространственного заряда ионного пучка, обусловленной уходом плазменных электронов в высоковольтный слой разделения зарядов через сеточный электрод.

С учетом наличия комплекса проблем определение энергетических параметров импульсно-периодического ионного пучка по осциллограммам тока и смещения будет иметь значительную погрешность.

Для большей точности измерения энергетических характеристик ионного пучка целесообразно использовать калориметрические методы. Однако и в этом случае необходимо принимать во внимание ряд особенностей, связанных с высокой интенсивностью ионного пучка. При плотностях ионного тока в несколько сотен миллиампер на сантиметр квадратный при энергии ионов около килоэлектронвольта плотность мощности в пучке будет составлять несколько сотен ватт на квадратный сантиметр. При таких плотностях мощности ионного пучка существенными становятся динамические эффекты нагрева мишени и градиенты температурных полей как по толщине, так и по поверхности облучаемой мишени.

2. РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

2.1. Получение профилей образцов с помощью профилометра «Micro Measure 3D Station»

Формируемые в процессе высокоинтенсивной ионной имплантации кратеры образцов измерялись с помощью трехмерного бесконтактного профилометра «Micro Measure 3D Station».

Принцип действия оптического профилометра заключается в том, что свет, излучаемый с источника, отражаясь от исследуемой поверхности, образует интерференционную картину, которая затем регистрируется видеокамерой. Далее данные обрабатываются, и набор интерференционных картин преобразуется в карту уровней поверхности высокого разрешения. Внешний вид профилометра представлен на рисунке 2.1.

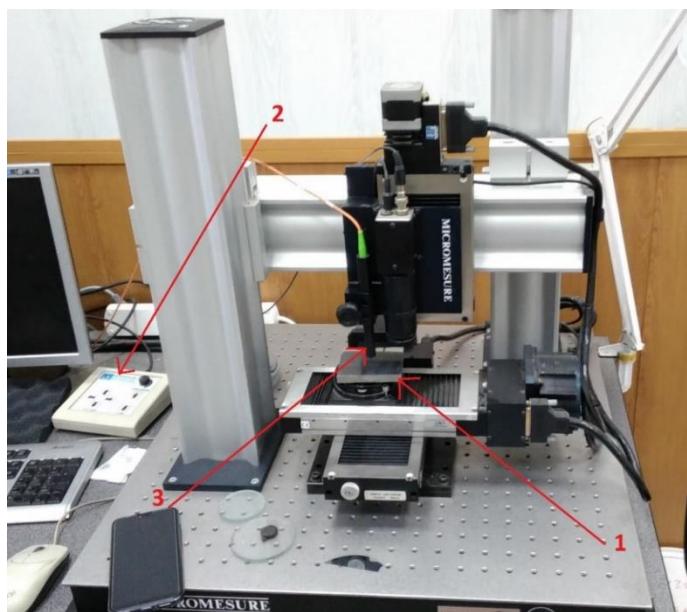


Рисунок 2.1 – Внешний вид профилометра «Micro Measure 3D Station»:
1 – регулируемый столик для образца, 2 – контроллер источника света, 3 – источник света.

Процесс получения профиля образца имеет определенную последовательность, которая имеет следующие этапы:

1. Образец помещается на столик 1, который способен регулироваться относительно источника света 3 таким образом, чтобы поверхность образца находилась в перпендикулярном положении относительно источника.

2. Далее с помощью контроллера 2 производится настройка сигнала источника света 3. Настройка включает в себя изменение расстояние между источником и поверхностью образца. Данная процедура не автоматизирована, а выполняется непосредственно самим оператором.

3. После настройки сигнала задается необходимая точность измерения поверхности и запускается процесс обработки образца.

4. После завершения процесса, профиль образца сохраняется в электронном формате, который в дальнейшем можно обработать с помощью программной среды Pioneer.

2.2. Обработка профилей в программной среде «Pioneer»

В результате работы профилометра «Micro Measure 3D Station», полученные профили необходимо обработать с помощью программы Pioneer. В качестве примера обработки был рассмотрен профиль образца из нержавеющей стали, который был модифицирован ленточным пучком ионов азота.

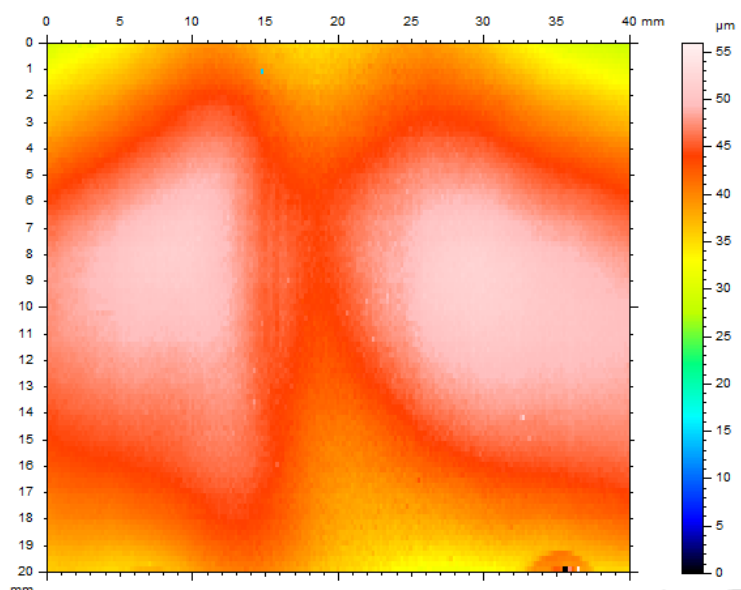


Рисунок 2.2 – Профиль образца в среде Pioneer

На рисунке 2.2 можно увидеть профиль образца, который был получен с помощью профилометра «Micro Measure 3D Station» и открыт в среде Pioneer. По двум осям находятся параметры образца, т.е. длина и ширина в мм, а справа - цветовой индикатор, который показывает изменение рельефа на поверхности образца в мкм. На рисунке 2.3 данный профиль можно наблюдать в трехмерном изображении.

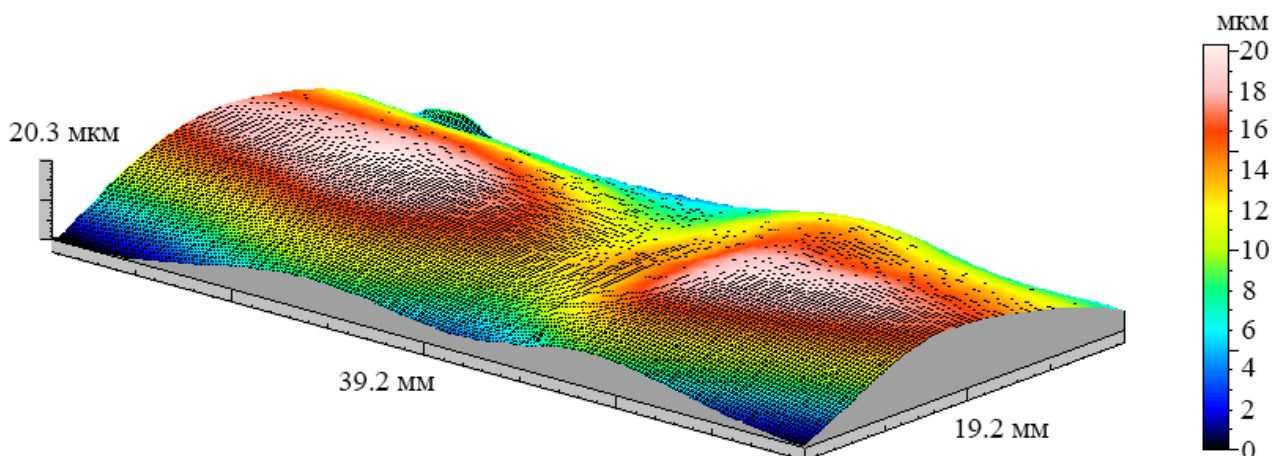


Рисунок 2.3 – Профиль образца в трехмерном изображении

Для того чтобы получить необходимый конечный профиль нужно пройти ряд процессов обработки, которые будут описаны ниже.

Первым делом необходимо выровнять профиль, что делается с помощью оператора «Leveling» в программной среде Pioneer. Данный оператор имеет следующий интерфейс, представленный на рисунке 2.4, в котором есть 3 типа выравнивания:

1. «User defined» – пользователь сам выбирает нужную площадь выравнивания или же программа выравнивает всю площадь автоматически, если ничего не задавать.
2. «Rectangular» – площадь задается в виде прямоугольника.
3. «3 Points with a neighborhood of N points» – выбираются 3 точки с окрестностью в N точек, и по этой области идет выравнивание.

В данном случае был выбран первый тип, где выравнивание выполняется автоматически.

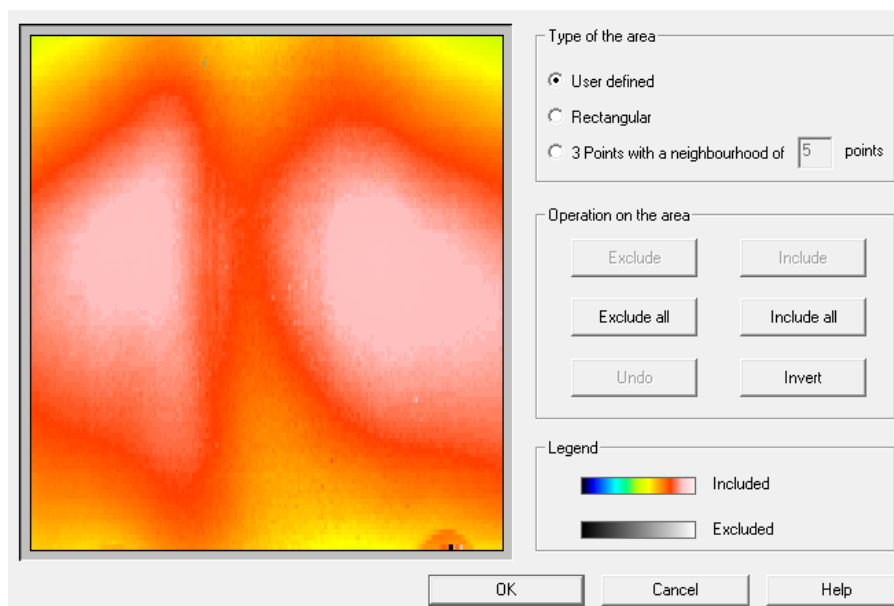


Рисунок 2.4 – Интерфейс оператора «Leveling»

Следующим этапом обработки является получение профиля с помощью оператора «Profile extraction». Интерфейс данного оператора можно наблюдать на рисунке 2.5.

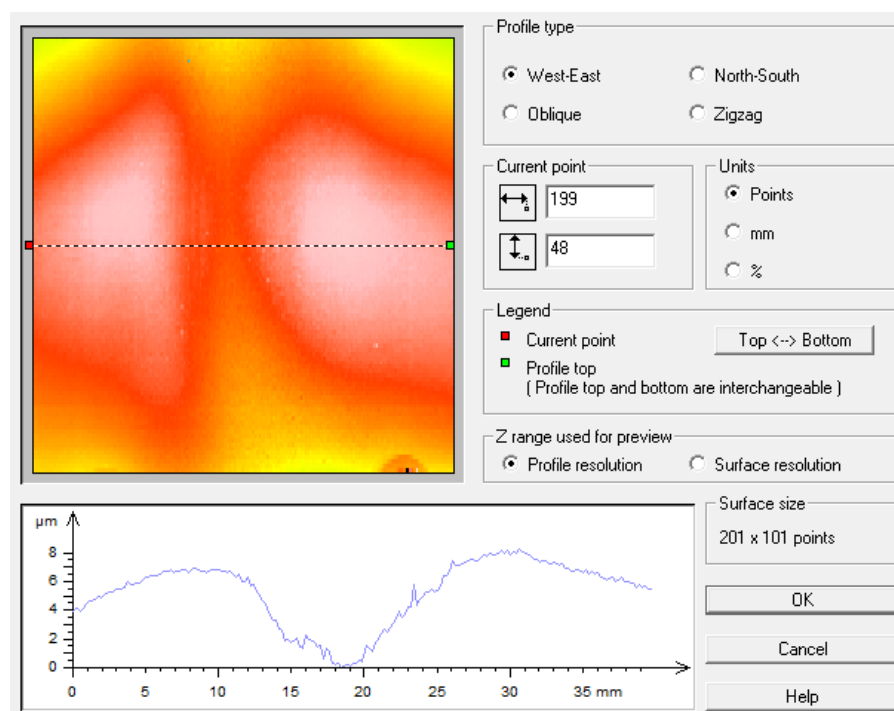


Рисунок 2.5 – Интерфейс оператора «Profile extraction»

Данный оператор имеет 4 типа профиля:

1. «West-East» – профиль по горизонтали.

2. «North-South» – профиль по вертикали.
3. «Oblique» – профиль выбирается в виде косо́й прямой.
4. «Zigzag» – профиль выбирается в виде произвольной кривой.

В данном случае был выбран первый тип «West-East», профиль которого можно увидеть на рисунке 2.6.

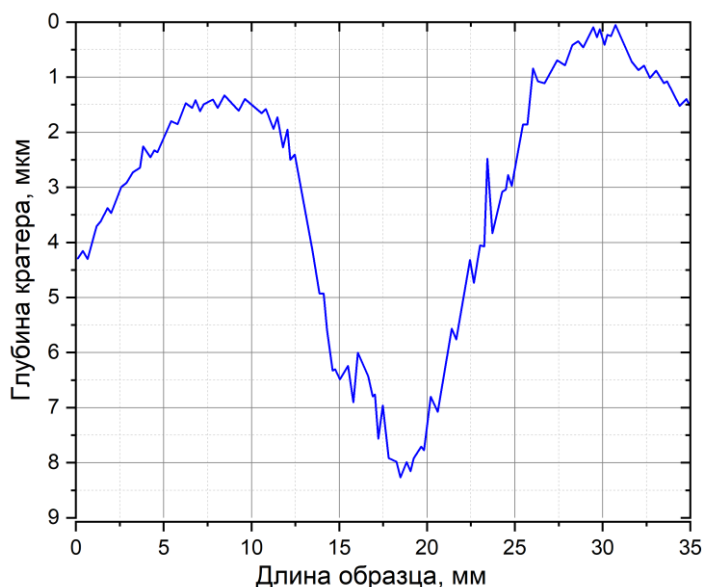


Рисунок 2.6 Профиль образца перед обработкой в программной среде Pioneer

Полученный профиль необходимо также обработать. Для начала его нужно выровнять относительно горизонтальной оси. Выравнивание проводится с помощью оператора «Leveling», только уже для двумерной версии профиля. Интерфейс оператора «Leveling» показан на рисунке 2.7. Принцип работы данного оператора заключается в том, что он включает или исключает выбранную пользователем площадь, относительно которой происходит процесс выравнивания. На рисунке 2.7 видно, что выбранная площадь является исключенной и она не будет учитываться при выравнивании профиля. Важной особенностью данного оператора является то, что можно наблюдать процесс выравнивания профиля в режиме реального времени.

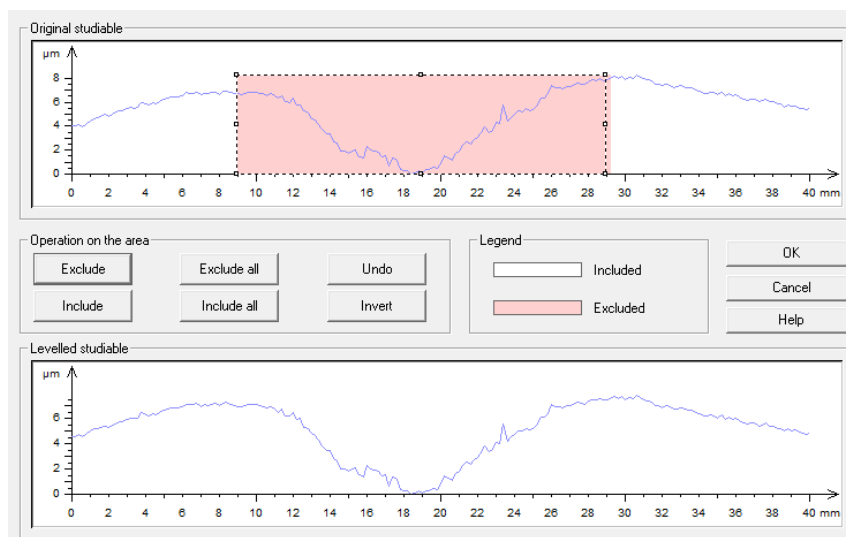


Рисунок 2.7 – Интерфейс оператора «Leveling» для двумерного профиля

После процесса выравнивания следующим этапом идет фильтрация или сглаживание профиля с помощью оператора «Filtering». Интерфейс оператора показан на рисунке 2.8.

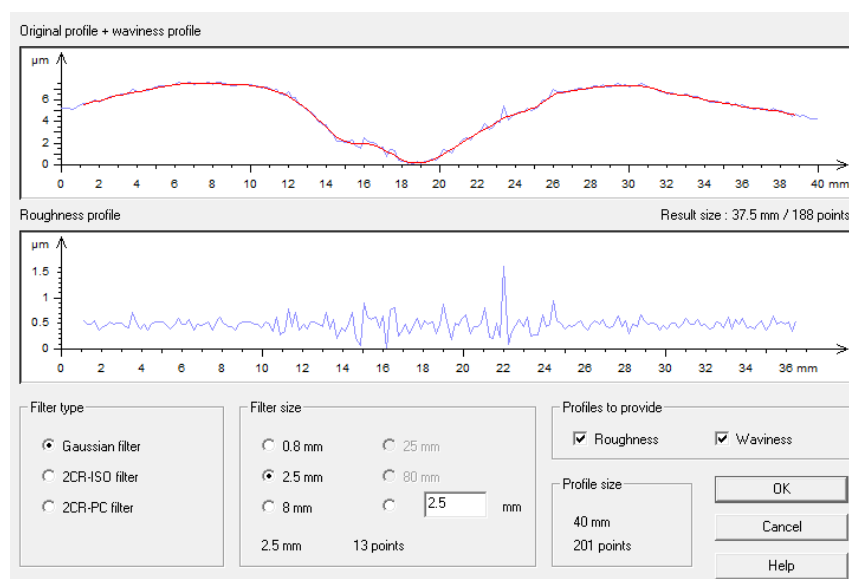


Рисунок 2.8 – Интерфейс оператора «Filtering» для двумерного профиля

Данный оператор имеет несколько типов фильтрации. В данной случае использован тип фильтрации «Gaussian filter» – электронный фильтр, импульсной переходной функцией которой является функция Гаусса. Данный фильтр снижает уровень шума в зависимости от размерности, которую также

можно задать, выбрав из предложенных (на рисунке 2.8 параметр «Filter Size»), либо задать необходимое значение вручную.

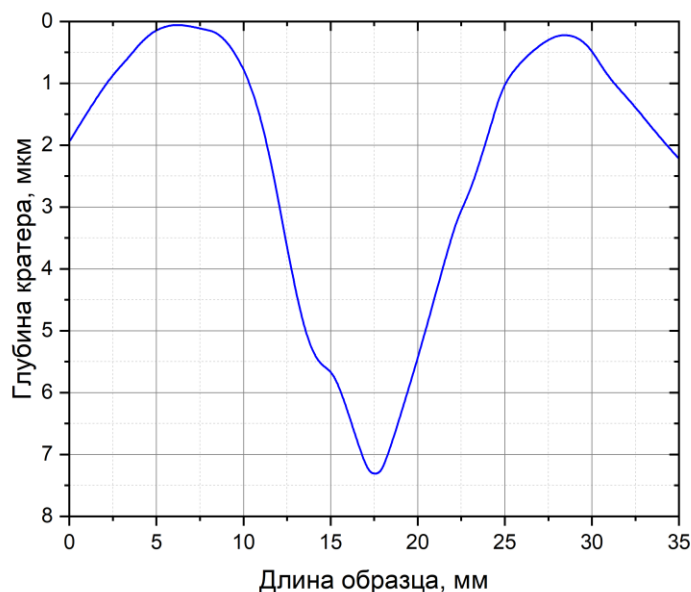


Рисунок 2.9 – Профиль образца после финальной обработки в программной среде Pioneer

Финальным этапом обработки профиля в программной среде Pioneer является корректировка графика с профилем для дальнейшей обработки в программном пакете Origin. Конечный результат профиля имеет вид, представленный на рисунке 2.9. Полученный профиль значительно отличается от первоначального вида, который показан на рисунке 2.6.

2.3. Развитие методики расчета плотности тока в условиях сферической фокусировки пучка

Для определения распределения плотности ионного тока пучка были использованы профили кратера распыления образцов из стали 40X. Модификация стали 40X проводилась с использованием высокоинтенсивного импульсно-периодического пучка ионов азота. Образец из стали 40X радиусом 10 мм и толщиной 4 мм лежал в центре пластины-держателя из нержавеющей стали 12X18Н10Т радиусом 30 мм и толщиной 3 мм. Генератор обеспечивал генерацию импульсов отрицательного потенциала смещения амплитудой 1.2 кВ,

при частоте следования импульсов 10^5 имп/с и длительности импульсов 4 мкс. Образцы из стали 40Х имплантировали ионами азота с энергией 1.2 кэВ в течение 60 мин. Все режимы ионной обработки дополнительно включали предварительный нагрев мишени ионным пучком в течение примерно 20 мин. В эксперименте использовалась фокусирующая система в виде части сферы радиусом 7.5 см.

При имплантации образцов высокоинтенсивными пучками ионов кратер распыления приобретает отчетливый характер, который можно увидеть на рисунке 2.10.

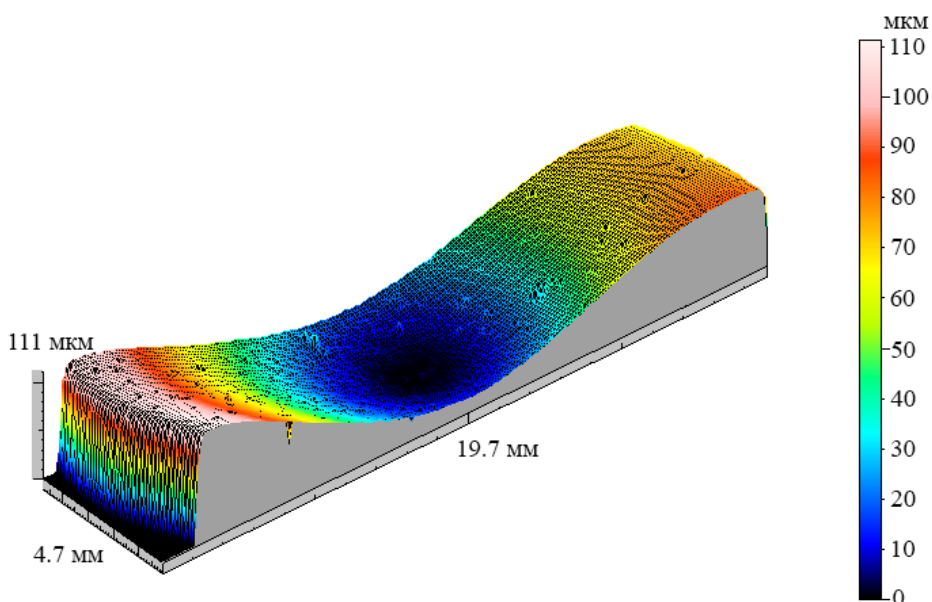


Рисунок 2.10 – Профиль кратера образца из стали 40Х в трехмерном изображении

Глубина кратера распыления составляет около 110 мкм. Благодаря представленному алгоритму в пункте 2.2 проводим обработку профиля в трехмерном изображении с использованием программной среды Pioneer и получаем отчетливый двумерный профиль, который можно увидеть на рисунке 2.11.

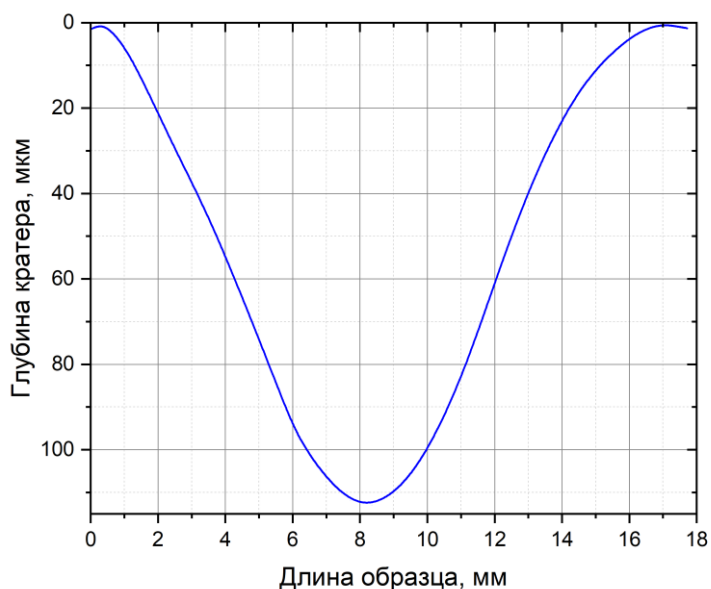


Рисунок 2.11 – Профиль кратера образца из стали 40X

Полученный профиль кратера образца отражает форму распределения плотности тока ионов. По мере изменения глубины кратера будет меняться и плотность тока, т.е. в самой глубокой точке кратера плотность тока имеет наибольшее значение. Исходя из этого, можно построить распределение плотности тока по сечению ионного пучка, приняв за максимальное значение плотности тока нормировочный коэффициент 1 (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Распределение плотности тока в образце с учетом нормировочного коэффициента 1 как максимальное значение плотности тока

Следующим этапом необходимо рассчитать площадь под кривой, чтобы в дальнейшем можно было найти полный объем кратера. Для этого необходимо

получить функцию, которая бы описывала поведение зависимости, представленной на рисунке 2.12. Используя метод наименьших квадратов можно получить функцию кривой в следующем виде:

$$f(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_nx^n, \quad (2.1)$$

где n – порядок полинома, k – коэффициенты полинома.

Далее проинтегрируем функцию (2.1) в пределах ионного пучка (от x_1 до x_2):

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = \int_{x_1}^{x_2} (k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_nx^n)dx \quad (2.2)$$

Так как зависимость имеет зеркальный вид относительно оси Y , то по свойству интегралов выражение (2.2) примет следующий вид:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = \int_{x_1}^0 f(x)dx + \int_0^{x_2} f(x)dx = 2 \cdot \int_0^{x_2} f(x)dx \quad (2.3)$$

Проведем интегрирование выражения (2.3) в указанных пределах:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \int_0^{x_2} f(x)dx &= 2 \cdot \int_0^{x_2} (k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_nx^n)dx = \\ &= 2 \cdot \left(k_0x + k_1 \frac{x^2}{2} + k_2 \frac{x^3}{3} + k_3 \frac{x^4}{4} + \dots + k_n \frac{x^{n+1}}{n+1} \right) \Bigg|_0^{x_2} = \\ &= 2 \cdot \left(k_0x_2 + k_1 \frac{x_2^2}{2} + k_2 \frac{x_2^3}{3} + k_3 \frac{x_2^4}{4} + \dots + k_n \frac{x_2^{n+1}}{n+1} \right); \end{aligned} \quad (2.4)$$

Полученное выражение (2.4) можно представить в виде суммы ряда:

$$2 \cdot \int_0^{x_2} f(x)dx = 2 \cdot \sum_{i=0}^n k_i \frac{x_2^{i+1}}{i+1}, \quad (2.5)$$

где n – порядок полинома.

Выражение (2.5) характеризует площадь под кривой распределения плотности тока:

$$S = 2 \cdot \sum_{i=0}^n k_i \frac{x_2^{i+1}}{i+1} \quad (2.6)$$

Чтобы рассчитать объем, кратер можно представить в виде цилиндра, а объем цилиндра запишется в следующем виде:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h, \quad (2.7)$$

где R – радиус цилиндра, h - высота цилиндра.

С учетом пределов ионного пучка выражение (2.7) для объема примет следующий вид:

$$V = \pi \cdot x_2^2 \cdot h, \quad (2.8)$$

где h можно найти из выражения (2.6), если представим площадь S в виде площади прямоугольника:

$$S = x_2 \cdot h = 2 \cdot \sum_{i=0}^n k_i \frac{x_2^{i+1}}{i+1} \quad (2.9)$$

Тогда, с учетом (2.9), выражение (2.8) примет следующий вид:

$$V = \pi \cdot x_2^2 \cdot h = \pi \cdot x_2^2 \cdot \frac{S}{x_2} = \pi \cdot x_2 \cdot S = \pi \cdot x_2 \cdot 2 \cdot \sum_{i=0}^n k_i \frac{x_2^{i+1}}{i+1} \quad (2.10)$$

Так как ионный ток известен, рассчитать плотность тока с использованием выражения (2.10) не составит труда:

$$J = \frac{I}{V} = \frac{I}{\pi \cdot x_2 \cdot 2 \cdot \sum_{i=0}^n k_i \frac{x_2^{i+1}}{i+1}} \quad (2.11)$$

Однако, чтобы детально описать поведение кривой функцией, необходимо прибегнуть к более высокому порядку полинома, что в свою очередь сказывается на громоздкости вычисления. Тем самым, в данной ситуации возникает актуальность в использовании вычислительной мощности ЭВМ.

2.4. Расчет плотности тока сфокусированного пучка

Далее проведем расчет плотности тока для трех имплантированных образца из стали 40Х при разных температурных режимах, но при одном и том

же значении ионного тока в 0.6 А. Выходные данные программы для каждого случая представлены ниже.

Таблица 2.1. Расчет плотности тока

№ образца	$T, ^\circ C$	$j, \frac{A}{cm^2}$	$j_{cp}, \frac{A}{cm^2}$
1	450	0.288307	0,309630
2	500	0.317627	
3	650	0.322957	

На основании полученных данных в таблице 2.1 и учета зависимости, представленной на рисунке 2.12 построим график распределения плотности тока. Для этого умножим максимальное значение нормировочного фактора на среднее значение плотности тока:



Рисунок 2.13 – График распределения плотности тока в пучке ионов азота

В результате полученной зависимости на рисунке 2.13 видно, что максимальное значение плотности тока достигается в центре пучка со значением 0,309630 А/см². Далее данное значение убывает в соответствии с зависимостью, представленной на рисунке 2.12 и достигает нуля при увеличении радиуса пучка до 8 мм.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МИШЕНЯХ В УСЛОВИЯХ ИХ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ.

3.1. Распределение температурных полей в образцах из Al и Ti при облучении пучком ионов азота

Задача об эволюции температуры и плавлении металлического образца под действием высокоинтенсивного импульсно-периодического ионного пучка решалась с использованием уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрических координатах. Используемая в расчетах модель разработана в Томском политехническом университете доктором физико-математических наук, профессором Блейхер Галиной Алексеевной.

Расчётная область задачи показана на рис. 3.1. Здесь металлический образец в виде диска радиусом R_1 и толщиной h_1 расположен на держателе в форме тонкой пластины-диска радиусом R_2 и толщиной h_2 . Так как распределение плотности тока в поперечном сечении пучка и облучаемые изделия имеют азимутальную симметрию, то она была использована при записи уравнения теплопроводности и решении задачи.

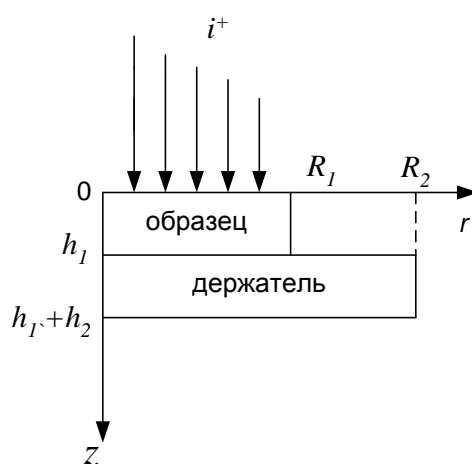


Рисунок 3.1 – Расчётная область: R_1 и R_2 – радиусы образца и держателя, h_1 и h_2 – толщины образца и держателя.

Математическая формулировка задачи с учётом затрат тепла на плавление элементов облучаемой композиции имеет следующий вид.

$$\frac{\partial E(z, r, t)}{\partial t} = \lambda(z) \frac{1}{r} \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} + \lambda(z) \frac{\partial^2 T(z, r, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z) \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial z} \right). \quad (3.1)$$

Здесь $E(z, r, t)$ и $T(z, r, t)$ – пространственно-временные функции, описывающие распределение тепловой составляющей внутренней энергии и температуры в облучаемой композиции, причём

$$T(z, r, t) = \begin{cases} E(z, r, t) / c(z)\rho(z), & E(z, r, t) \leq E_m(z), \\ T_m(z), & E_m(z) < E(z, r, t) \leq E_m(z) + q_m(z)\rho(z), \\ T_m(z) + (E(z, r, t) - (E_m(z) + q_m(z)\rho(z))) / c(z)\rho(z), & E(z, r, t) > E_m(z) + q_m(z)\rho(z). \end{cases} \quad (3.2)$$

Здесь λ , c , ρ – соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность облучаемого вещества; T_m и q_m – температура и удельная теплота плавления; $E_m = T_m c \rho$. В зависимости от z , принимаются теплофизические характеристики либо образца, либо держателя.

Запись уравнения теплопроводности в форме (3.1), где E и T связаны соотношениями (3.2), позволяет учесть в расчётах затраты тепла на плавление.

Начальные условия:

$$T(z, r) = T_0, \quad E(z, r) = T_0 c(z) \rho(z) \quad (3.3)$$

Граничные условия на облучаемых поверхностях образца и держателя:

$$\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\substack{z=0, \\ 0 \leq r \leq R_1}} = \lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\substack{z=h_1, \\ R_1 < r \leq R_2}} = -q(r) + \varepsilon_p (T^4 - T_{ch}^4). \quad (3.4)$$

Здесь $q(r)$ – плотность мощности ионного пучка, усреднённая по периоду, T_{ch} – температура стенок вакуумной камеры, ε_p – приведённая степень черноты поверхности (образца или держателя):

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_{ch}} - 1}, \quad (3.5)$$

где ε – степень черноты поверхности (образца или держателя), ε_{ch} – степень черноты стенок вакуумной камеры. В расчётах $T_{ch} = 300$ К, $\varepsilon_{ch} = 1$.

На остальных открытых поверхностях композиции заданы стоки тепла за счёт теплового излучения, на оси $r=0$ $-\lambda(z)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0$.

Предполагается идеальный теплопроводный контакт в области соприкосновения образца и держателя.

Затраты энергии пучка на распыление не учитываются, так как они ничтожно малы по сравнению с мощностью пучка и теплового излучения. Испарение также не принимается во внимание, так как целью исследований являются такие режимы облучения, при которых заметное испарение не должно развиваться.

Распределение плотности тока получено из предыдущих расчетов, которые продемонстрированы во второй главе.

3.1.1. Моделирование температурных полей в мишенях из Ti

Температура обрабатываемых мишеней играет очень большую роль в процессах имплантации примеси в поверхностные слои при ионно-плазменной обработке изделий. От температуры зависит не только состояние вещества, но и фазовый состав имплантируемого слоя, а также скорость диффузии внедряемого вещества. Все эти параметры в последующем влияют на свойства готовых изделий.

Титан обладает высокой прочностью, хорошей коррозионной стойкостью и при этом имеет сравнительно небольшую массу, что делает его применение незаменимым в областях, где важны хорошие механические свойства изделий одновременно с их массой. Титан и его сплавы нашли применение в металлургии, военной промышленности, электротехнике и радиотехнике, химической промышленности, судостроении и других сферах жизни.

В таблице 3.1 представлены параметры образца и держателя, которые использовались при моделировании температурных полей в образце из титана.

Таблица 3.1 – Параметры материалов, использованные в расчётах

Критерий	Образец	Держатель
Материал	Ti	12X18H10T
Толщина, мм	3	3
Радиус, мм	20	30
Плотность, кг/м ³	4505	7920
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	18,85	15
Удельная теплоёмкость Дж/(кг·град)	540	465
Степень черноты поверхности	0,2	0,6
Температура плавления, К	1940	1728
Удельная теплота плавления, Дж/кг	$0,358 \cdot 10^6$	$0,245 \cdot 10^6$

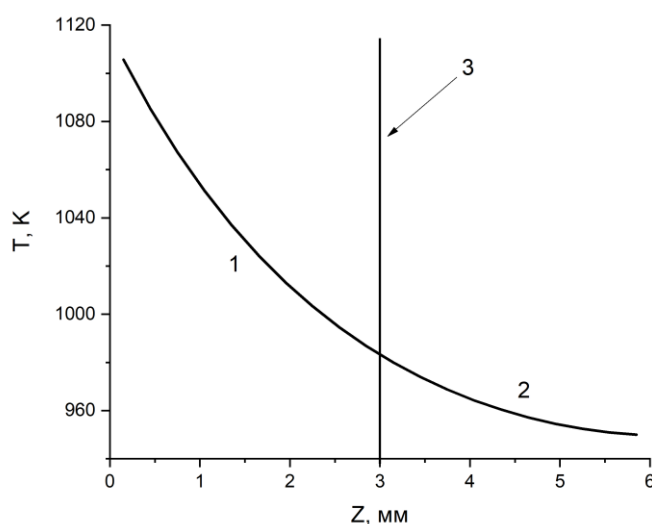


Рисунок 3.2 – Распределение температуры T по глубине (z) облучаемой композиции, вдоль оси $r=0$, где 3 – граница раздела между образцом и держателем, 1 – область образца из Ti, 2 – область держателя из 12X18H10T

На рисунке 3.2 представлен график распределения температуры по глубине для образца из Ti и держателя из 12X18H10T. Градиент температуры по глубине мишени из титана составляет 121 К. Для держателя из 12X18H10T градиент температуры по глубине будет 34 К.

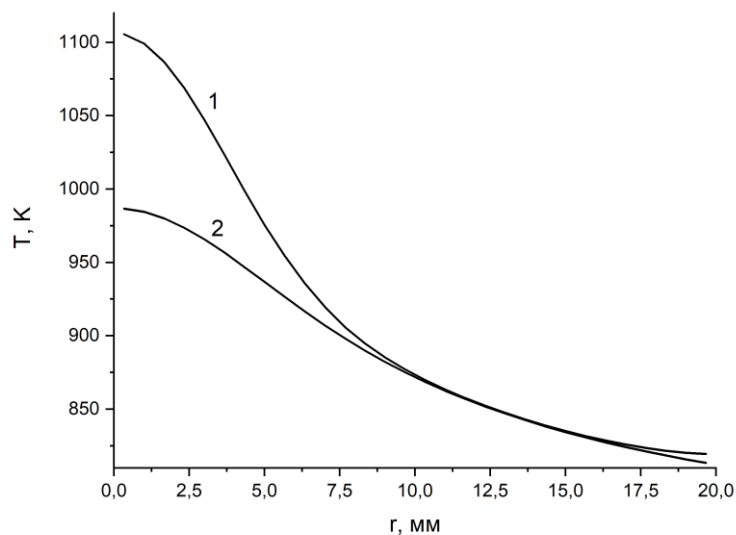


Рисунок 3.3 – Распределение температуры вдоль поверхности образца ($r=0$ – центр поперечного сечения образца): 1 – облучаемая поверхность образца из Ti; 2 – нижняя поверхность образца из Ti

На рисунке 3.3 представлено распределение температуры вдоль двух поверхностей образца из титана, с облучаемой и с нижней его частей. Градиент температуры вдоль облучаемой поверхности образца составляет 288 К. Для нижней поверхности образца градиент температуры будет составлять 174 К.

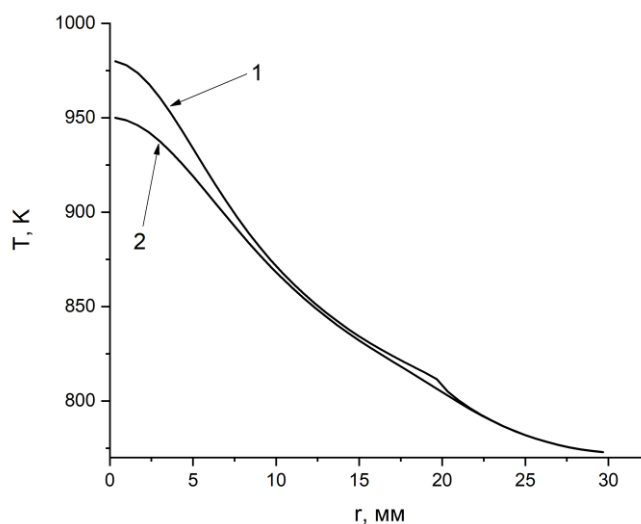


Рисунок 3.4 – Распределение температуры вдоль поверхности держателя ($r=0$ – центр поперечного сечения держателя): 1 – верхняя поверхность держателя из 12X18N10T; 2 – нижняя поверхность держателя из 12X18N10T

На рисунке 3.4 представлено распределение температуры вдоль двух поверхностей держателя. Градиент температуры вдоль верхней поверхности держателя из 12X18Н10Т составляет 207 К. Вдоль нижней поверхности держателя градиент температуры составляет 177 К.

3.1.2. Моделирование температурных полей в мишенях из Al

Алюминий и его сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов, особенно в аэрокосмической и автомобильной промышленности, благодаря их низкой плотности, отличной литейной способности, высокой теплопроводности и электропроводности, а также превосходной коррозионной стойкости при высоких температурах [21,22]. Легкие металлы использовались в автомобильных деталях для снижения веса автомобилей с целью значительного снижения выбросов CO₂ и нагрузки на окружающую среду [23]. Фактически, многие классы автомобилей и компоненты подвески изготовлены из алюминиевых сплавов для улучшения отношения прочности к весу. Также алюминий необходим для производства вагонов скоростных поездов, морских судов. Самые разные виды продуктов из алюминия используются в современном строительстве. Алюминий является основным материалом для высоковольтных линий электропередачи. Однако большинство алюминиевых сплавов имеют низкую твердость и износостойкость, что ограничивает их широкое применение, особенно в нагруженных деталях и деталях трения. Чтобы расширить проникновение алюминиевых сплавов в полностью алюминиевый автомобиль, необходимы различные виды обработки поверхности для улучшения их первоначальных низких трибологических свойств.

В таблице 3.2 представлены все параметры образца и держателя, которые использовались при моделировании температурных полей.

Таблица 3.2 – Параметры материалов, использованные в расчётах

Критерий	Образец	Держатель
Материал	Al	12X18H10T
Толщина, мм	3	3
Радиус, мм	20	30
Плотность, кг/м ³	2700	7920
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	236	15
Удельная теплоёмкость Дж/(кг·град)	917	465
Степень черноты поверхности	0,1	0,6
Температура плавления, К	933	1728
Удельная теплота плавления, Дж/кг	$0,390 \cdot 10^6$	$0,245 \cdot 10^6$

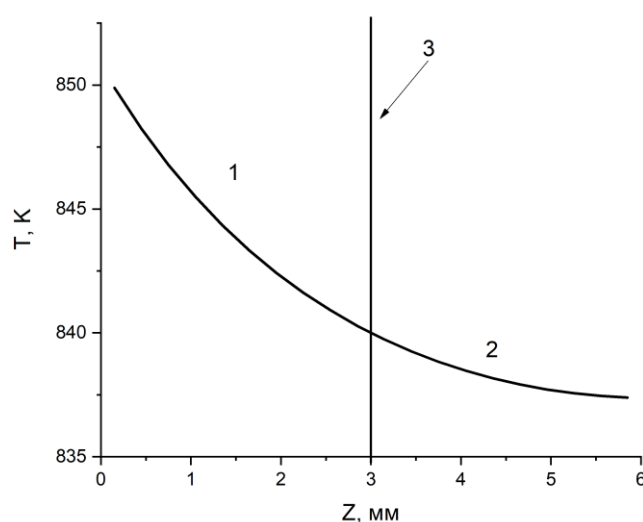


Рисунок 3.5 – Распределение температуры T по глубине (z) облучаемой композиции, вдоль оси $r=0$, где 3 – граница раздела между образцом и держателем, 1 – область образца из Al, 2 – область держателя из 12X18H10T

На рисунке 3.5 представлен график распределения температуры по глубине для образца из Al и держателя из 12X18H10T. Градиент температуры по глубине мишени из алюминия составляет 11 К. Для держателя из 12X18H10T градиент температуры по глубине составляет всего 3 К.

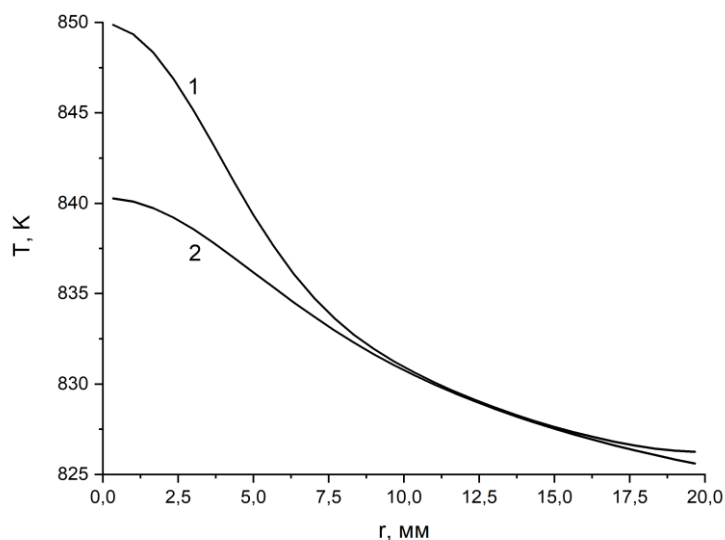


Рисунок 3.6 - Распределение температуры вдоль поверхности образца ($r=0$ – центр поперечного сечения образца): 1 – облучаемая поверхность образца из Al; 2 – нижняя поверхность образца из Al

На рисунке 3.6 представлено распределение температуры вдоль двух поверхностей образца из алюминия, с облучаемой и с нижней его частей. Градиент температуры вдоль облучаемой поверхности образца составляет 24 К. Для нижней поверхности образца градиент температуры будет составлять 14 К.

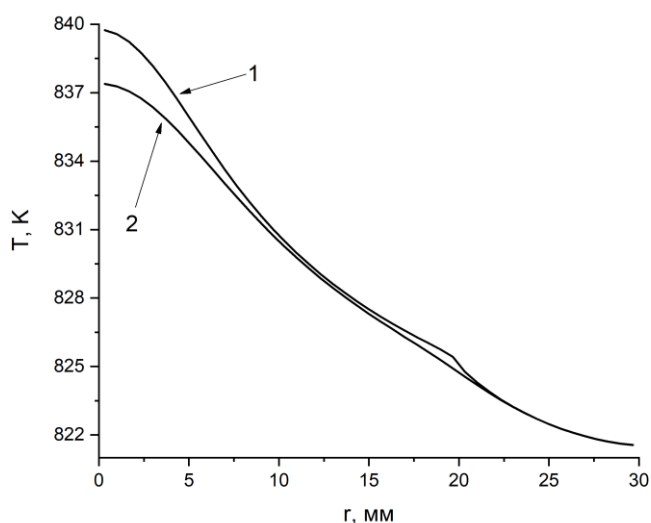


Рисунок 3.7 – Распределение температуры вдоль поверхности держателя ($r=0$ – центр поперечного сечения держателя): 1 – верхняя поверхность держателя из 12X18H10T; 2 – нижняя поверхность держателя из 12X18H10T

На рисунке 3.7 представлено распределение температуры вдоль двух поверхностей держателя. Градиент температуры вдоль верхней поверхности держателя из 12Х18Н10Т составляет 18 К. Вдоль нижней поверхности держателя градиент температуры составляет 15 К.

3.2. Исследование влияния температурных полей внутри образцов из Ti и Al при использовании в качестве теплоотвода различных охлаждающих веществ

Расчёт температуры в металлических образцах под действием высокоинтенсивного импульсно-периодического ионного пучка выполнялся с использованием математической модели, построенной на основе уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрических координатах с азимутальной симметрией.

Расчётная область задачи показана на рисунке 3.8. Металлический образец выполнен в виде диска радиусом R и толщиной Z_1 .

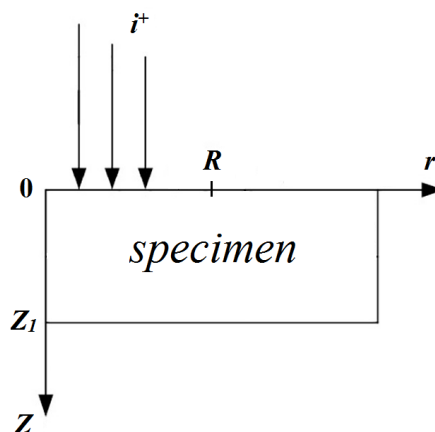


Рисунок 3.8 – Расчётная область: R и Z_1 – радиус и толщина образца, соответственно.

Уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T(z, r, t)}{\partial t} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(z, r, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T(z, r, t)}{\partial z^2} \right). \quad (3.1)$$

Здесь $T(z, r, t)$ – пространственно-временная функция, описывающая распределение температуры в облучаемом образце, а λ – коэффициент температуропроводности облучаемого материала.

Граничные условия на облучаемой поверхности образца:

$$\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\substack{z=0, \\ 0 \leq r \leq R}} = -q(r) + \varepsilon_p (T^4 - T_{ch}^4). \quad (3.2)$$

Здесь $q(r)$ – плотность мощности ионного пучка, усреднённая по периоду, R – радиус поперечного сечения пучка, T_{ch} – температура стенок вакуумной камеры, ε_p – приведённая степень черноты поверхности образца, рассчитываемая с учётом отражения теплового излучения от стенок вакуумной камеры:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_{ch}} - 1}, \quad (3.3)$$

где ε и ε_{ch} – степень черноты поверхности образца и стенок вакуумной камеры соответственно. В расчётах $T_{ch}=300$ К, $\varepsilon_{ch}=1$.

На облучаемой поверхности вне зоны действия пучка и на боковой поверхности образца задан сток тепла за счёт теплового излучения, на оси $r=0$ –

$\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$. На тыльной поверхности образца – $T=T_{cool}$, где T_{cool} – температура охлаждающей жидкости.

Функция плотности тока получена из предыдущих расчетов, которые продемонстрированы во второй главе.

Численные расчеты выполнены для образцов из алюминия и титана радиусом 20 мм и толщиной 3 мм. На необлучаемой стороне мишени был задан конвективный теплообмен. При моделировании в качестве охладителя обратной стороны мишени были использованы: вода, жидкий азот и жидкий гелий.

3.2.1. Моделирование температурных полей внутри образца из Ti

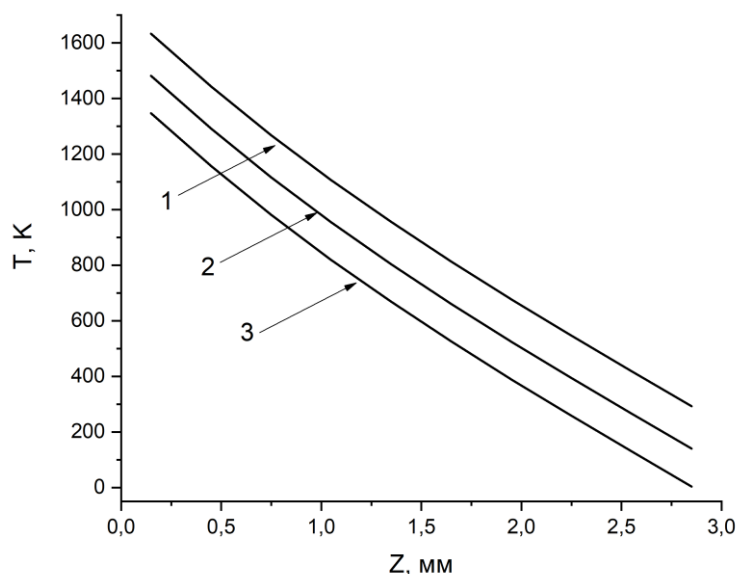


Рисунок 3.9 – Распределение температуры T по глубине (Z) образца из Ti толщиной 3 мм вдоль оси $r=0$ при разной температуре охлаждения необлучаемой стороны мишени T_{back} : 1 – $T_{\text{back}}=293$ К, 2 – $T_{\text{back}}=140$ К, 3 – $T_{\text{back}}=4$ К.

Плотность мощности при каждом режиме охлаждения одинакова и равна $Q=407,4$ Вт/см².

Градиент температур по глубине мишени из титана в условиях принудительного охлаждения водой, жидким азотом и жидким гелием составляет 1343 К для всех режимов. Максимальная температура на поверхности мишени достигло 1630 К при охлаждении водой. В случае охлаждения жидким азотом максимальная температура составляет 1482 К, для случая с жидким гелием максимальная температура 1345 К.

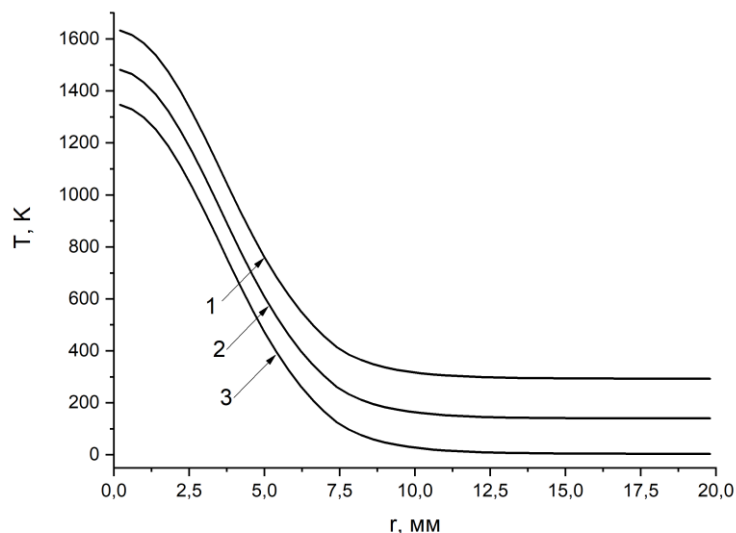


Рисунок 3.10 – Распределение температуры T по радиусу (r) образца из Ti толщиной 3 мм при разной температуре охлаждения необлучаемой стороны мишени T_{back} : 1 – $T_{back}=293$ К, 2 – $T_{back}=140$ К, 3 – $T_{back}=4$ К.

Градиент температур по радиусу образца титана в условиях принудительного охлаждения водой, жидким азотом и жидким гелием составляет 1344 К для всех режимов.

В работе [24] были проведены исследования микроструктурного, элементного и фазового составов поверхностных и приповерхностных слоев титана после имплантации ионами алюминия. Показано, что в случае высокоинтенсивной низкоэнергетической ионной имплантации поверхностная концентрация легирующей примеси достигала максимума 25 ат. %, но глубина проникновения значительно увеличивалась и достигла 50 мкм. Образец в этих экспериментах нагревался до температуры 1170 К.

На основании полученных результатов модели можно сделать вывод, что охлаждение необлучаемой стороны образца повлияет на развитие микроструктуры поверхностных и приповерхностных слоев титана. Однако, реализация подобной системы охлаждения не целесообразна и будет разумнее производить модификацию поверхностных и приповерхностных слоев пучками ионов азота с более низкой мощностью.

3.2.2. Моделирование температурных полей внутри образца из Al

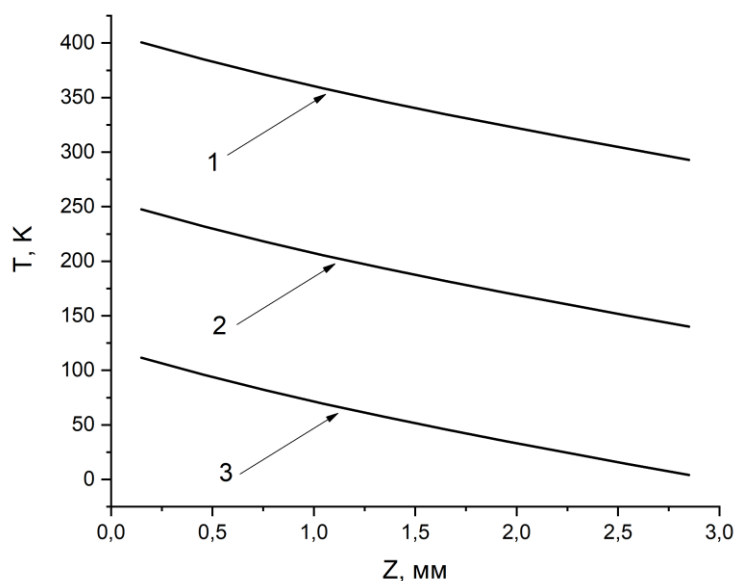


Рисунок 3.11 – Распределение температуры T по глубине (Z) образца из Al толщиной 3 мм вдоль оси $r=0$ при разной температуре охлаждения необлучаемой стороны мишени T_{back} : 1 – $T_{\text{back}}=293$ К, 2 – $T_{\text{back}}=140$ К, 3 – $T_{\text{back}}=4$ К.

Плотность мощности при каждом режиме одинакова и равна $Q=407,4$ Вт/см².

Градиент температур по глубине мишени из алюминия в условиях принудительного охлаждения водой, жидким азотом и жидким гелием составляет 110 К для всех режимов. Максимальная температура на поверхности мишени достигает 402 К при охлаждении водой. В случае охлаждения жидким азотом максимальная температура составляет 247 К, для случая с жидким гелием максимальная температура 110 К.

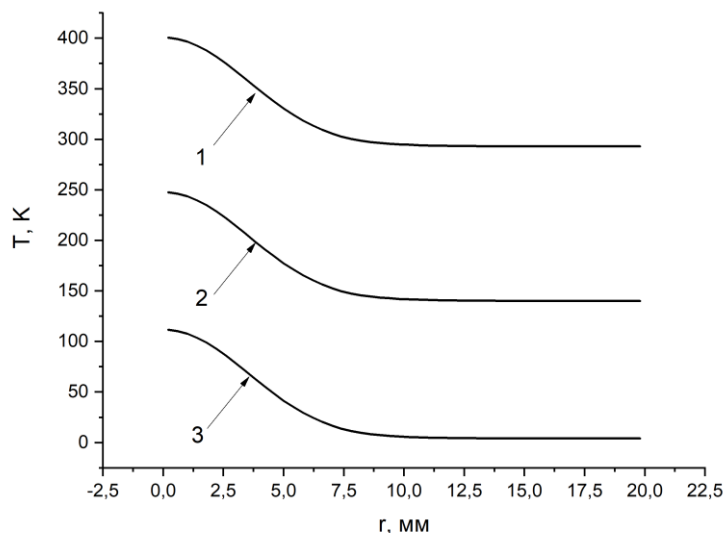


Рисунок 3.12 – Распределение температуры T по радиусу (r) образца из Al толщиной 3 мм при разной температуре охлаждения необлучаемой стороны мишени T_{back} : 1 – $T_{\text{back}}=293$ К, 2 – $T_{\text{back}}=140$ К, 3 – $T_{\text{back}}=4$ К.

Градиент температур по радиусу образца алюминия в условиях принудительного охлаждения водой, жидким азотом и жидким гелием составляет 108 К для всех режимов.

В работе [25] продемонстрирована возможность глубокой модификации поверхности алюминия с помощью высокоинтенсивного ленточного ионного пучка низкой энергии. Было установлено, что тонкий (0,4 мкм) модифицированный слой со структурой hcp Ti(Al) образуется только на поверхности при 623 К, в то время как образование упорядоченных интерметаллидов Al_3Ti происходит при температурах имплантации 723 и 823 К. Несмотря на значительное ионное распыление поверхности, толщина модифицированного слоя увеличивается от ~ 1 мкм до ~ 6 мкм, а температура имплантации повышается с 723 до 823 К. Было обнаружено, что гомогенный интерметаллический слой Al_3Ti толщиной до 5 мкм формировался при 823 К.

На основании полученных результатов модели можно сделать вывод, что охлаждение необлучаемой стороны образца из алюминия нецелесообразно использовать по причине того, что полученные значения максимальных температур поверхностных слоев достаточно низкие, чтобы сформировать

глубокий модифицированный слой. Анализируя результат моделирования температурных градиентов можно отметить, что для получения глубоколегированных приповерхностных слоев разумнее использовать пучки более высокой мощности.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1. Введение для раздела

К настоящему времени, успех реализации НИР зависит не от преимуществ в технических параметрах над конкурентными исследованиями, а от востребованности на рынке, цене реализации, необходимого для исследования бюджета, а также времени для успешного внедрения на рынок.

В данном разделе приводится оценка коммерческой ценности и перспективности описываемого в ВКР исследования. Осуществляется данная оценка посредством решения следующих задач:

- 1) Оценка коммерческого потенциала разработки.
- 2) Планирование научно-исследовательской работы.
- 3) Расчет бюджета научно-исследовательской работы.
- 4) Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной ВКР – провести численное моделирование температурных полей на основании полученных параметрах высокоинтенсивных ионных пучков в мишенях под их воздействием.

4.2. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.2.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является определения оптимальных параметров ионной имплантации и расчеты тепловых полей в мишенях при воздействии высокоинтенсивными ионными пучками. Потенциальными потребителями результатов исследований являются организации в сфере авиастроения, машиностроения и ядерной энергетики. В каждой сфере необходимо модифицировать материалы, добиваясь новых свойств и качеств.

Это означает, что потребители – крупные коммерческие и некоммерческие организации отраслевой принадлежности.

Для определения группы потребителей, которых может заинтересовать результаты данных научных исследований, необходимо провести сегментирование рынка.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по ионной модификации поверхности

		Вид услуги		
		Модификация поверхностного слоя	Нанесение защитных покрытий	Модификация поверхности сложных деталей
Вид промышленности	Машиностроение		■	■
	Авиастроение		■	■
	Ядерная энергетика		■	■
	Космическая промышленность		■	■
	Advenira Enterprises	■	ЗАО «МАНЭЛ»	Группа компаний «Плакарт»

В качестве конкурентных компаний были рассмотрены: Advenira Enterprises, ЗАО «МАНЭЛ», Группа компаний «Плакарт». Компания Advenira Enterprises предоставляет услуги по нанесению нанопокровов на различные поверхности. Среди клиентов – машиностроительные, трубные и авиакосмические компании страны. ЗАО «МАНЭЛ» – наноструктурные неметаллические неорганические покрытия. Машиностроение и строительство.

Группа компаний «Плакарт» – многофункциональные наноструктурированные защитные покрытия. Машиностроение, авиастроение, ядерная энергетика.

Исходя из карты сегментирования рынка услуг по модификации поверхностей, результаты научных исследований могут быть предложены в сегменте рынка модификации поверхностей сложных деталей (в том числе и с отверстиями) ядерной энергетике. Также можно выбрать сегмент модификации

поверхностного слоя деталей авиастроения и/или космической промышленности, учитывая не высокую конкуренцию.

4.2.2. Анализ конкурентных технических решений

Основой анализа конкурентного технического решения будет выбор технического исполнения задачи. В качестве собственного варианта технического исполнения работы будем считать использование программы, разработанной в Томском политехническом университете доктором физико-математических наук, профессором Блейхер Галиной Алексеевной. В качестве конкурентного Wolfram Mathematica – универсальный инструментарий для моделирования тепловых процессов в мишенях заданной формы. Ниже приведена таблица сравнения собственного технического исполнения с конкурентными (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Удобство интерфейса.	0,07	4	3	0,28	0,21
2. Удобство установки.	0,1	5	3	0,5	0,3
3. Предоставляемые возможности моделирования.	0,2	4	5	0,8	1
4. Срок выполнения поставленной задачи, при использовании тех. решения.	0,3	4	4	1,2	1,2
5. Начальные навыки для пользования.	0,2	4	3	0,8	0,6
Экономические критерии оценки эффективности					
6. Финансовая доступность для пользователя	0,13	4	5	0,52	0,65
Итого	1	25	23	4,1	3,96

B_{ϕ} , K_{ϕ} – баллы и конкурентоспособность программы, разработанной в Томском политехническом университете доктором физико-математических наук, профессором Блейхер Галиной Алексеевной, соответственно.

B_{k1} , K_{k1} – баллы и конкурентоспособность программы Wolfram Mathematica соответственно.

Проведенный анализ показывает, что для выполнения исследования лучше подходит используемое техническое исполнение.

4.2.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ внутренних и внешних факторов научно-исследовательского проекта, направленный на оценку рисков и конкурентоспособности проекта на рынке.

В таблице 4.3 приведена итоговая SWOT-матрица, содержащая в себе оценку сильных и слабых сторон технического исполнения задания, а также их связь с возможностями и угрозами.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	Сильные стороны технического исполнения:	Слабые стороны технического исполнения:
	<p>С1. Простая установка ПО на ПЭВМ.</p> <p>С2. Простой для использования интерфейс.</p> <p>С3. Наличие инструкции и примеров для обучения использованию функционала программы.</p> <p>С4. Настроенные режимы расчетов для выполнения конкретных задач.</p> <p>С5. Графическое отображение полученных зависимостей, геометрии моделирования, некоторых результатов.</p> <p>С6. Начальные параметры модели задаются в файле и для изменения параметров требуют изменения лишь нескольких цифр.</p>	<p>Сл1. Ограниченное количество режимов расчета.</p> <p>Сл2. Не полное отображение интерфейса на ПЭВМ с соотношением сторон монитора не 4:3.</p> <p>Сл3. Получение большей точности требует увеличения длительности расчетов.</p> <p>Сл4. Не все результаты расчета имеют графическое отображение в программе. Для некоторых требуется самостоятельное построение на основе данных из файла результатов.</p>

	С7. По окончании расчета создается файл, содержащий в себе подробный отчет о результатах.	
<p>Возможности:</p> <p>В1. Расчет тепловых полей при различных параметрах высокоинтенсивных ионных пучков.</p> <p>В2. Комбинированный расчет тепловых зависимостей.</p> <p>В3. Оценка уже существующих систем и моделей с возможностью их дополнения.</p> <p>В4. Появление новых режимов и обновление программного кода.</p>	<p>В1С3С6. Наличие инструкции и настроенного файла входных данных позволяет легко и быстро менять параметры модели.</p> <p>В2С3С4С6. Готовые режимы для расчета, инструкция и правильно сделанный файл данных позволят выполнять расчеты в области ионной имплантации.</p> <p>В3С3С4С5С6С7.</p> <p>Инструкция, готовые примеры и настроенные режимы, на основе которых можно будет построить файл входных модели. Для удобства, часть результатов имеет графическое отображение в программе в реальном времени, за более подробными результатами всегда можно будет обратиться к файлу результатов расчета.</p>	<p>В4Сл1Сл2Сл4.</p> <p>Дальнейшее обновление программы, оптимизация ее под широкоформатные мониторы, добавление новых режимов для увеличения спектра выполняемых задач сделают ее еще более удобной и эффективной для моделирования.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Редкое обновление ПО.</p> <p>У2. Наличие зарубежных конкурентов в области моделирования.</p>	<p>У1С4. Несмотря на редкое обновление программа может выполнять достаточно широкий спектр задач и имеет большие перспективы развития.</p> <p>У2С1С2С3. По сравнению с зарубежными конкурентами программа имеет более простую установку и интерфейс. В дополнение к этому она имеет встроенную в функционал программы инструкцию и примеры для каждого режима расчета.</p>	<p>У1Сл2Сл3. Введение поддержки широкоформатных мониторов и оптимизация кода, для лучшего использования мощностей ПЭВМ.</p> <p>У2Сл3. Использование более мощной ПЭВМ для уменьшения времени расчета.</p>

Табл. 4.4, 4.5, 4.6 и 4.7 показывают соответствие сторон возможностям и угрозам. Знак «+» означает сильное соответствие, знак «-» – слабое.

Таблица 4.4 – Соответствие сильных сторон возможностям

		Сильные стороны						
		С1	С2	С3	С4	С5	С6	С7
Возможности	В1	-	-	+	-	-	+	-
	В2	-	-	+	+	-	+	-
	В3	-	-	+	+	+	+	+
	В4	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 4.5 – Соответствие слабых сторон возможностям

Слабые стороны					
Возможности		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	-	-	-	-
	B2	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-
	B4	+	+	-	+

Таблица 4.6 – Соответствие сильных сторон угрозам

Сильные стороны								
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	У1	-	-	-	+	-	-	-
	У2	+	+	+	-	-	-	-

Таблица 4.7 – Соответствие слабых сторон угрозам

Слабые стороны					
Угрозы		C1	C2	C3	C4
	У1	-	+	+	-
	У2	-	-	+	-

Судя по преимуществам и недостаткам, использование данного варианта технического исполнения является оправданным. Анализ возможностей и угроз поможет в будущем устранить недостатки технического исполнения и в целом увеличить эффективность работы.

4.3. Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- 1) определение структуры работ в рамках научного исследования;
- 2) определение количества исполнителей для каждой из работ;
- 3) установление продолжительности работ;
- 4) построение графика проведения научных исследований.

Сформирована рабочая группа, состоящая из 2-х человек – руководителя и инженера, определены основные этапы, порядок и содержание работ. Для каждого этапа определены исполнители, данные приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8 – Основные этапы, содержание и исполнители работы

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	Инженер, руководитель
Теоретическое исследование	3	Планирование моделирования	Инженер
	4	Подготовка файлов данных	Инженер
	5	Проведение моделирования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	6	Обработка полученных данных	Инженер, руководитель
	7	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, руководитель
Оформление отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Инженер

4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Для того чтобы определить ожидаемое (среднее) значение трудоемкости использована следующая формула:

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

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{min}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается

параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где T_{p_i} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{ki} = T_{p_i} k_{кал}, \quad (4.3)$$

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

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

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4.4)$$

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

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

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

Принимая во внимание, что количество нерабочих дней в 2021 году для шестидневной рабочей недели равно 66 дней, то календарный коэффициент будет равен:

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22 \quad (4.5)$$

Все рассчитанные значения с округлением до целого числа занесем в таблицу 4.9:

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожі}$, чел-дни					
	НР	И	НР	И	НР	И	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	2	-	4	-	3	-	3	-	3	-
2. Календарное планирование выполнения ВКР	1	3	3	4	2	3	1	2	1	2
3. Планирование моделирования	-	6	-	10	-	8	-	8	-	9
4. Подготовка файлов данных	-	5	-	7	-	6	-	6	-	7
5. Проведение моделирования	-	15	-	30	-	21	-	21	-	26
6. Обработка полученных данных	1	10	2	15	1	12	1	6	1	7
7. Оценка правильности полученных результатов	1	5	2	10	1	7	1	4	1	4
8. Составление пояснительной записки	-	10	-	15	-	12	-	12	-	15
Итого:	5	54	11	91	7	69	5	58	6	70

Примечание: НР – Научный руководитель, И – Инженер.

Далее (рис. 4.1) приведен календарный план-график с диаграммой Ганта, построенный на основании таблицы 4.9.

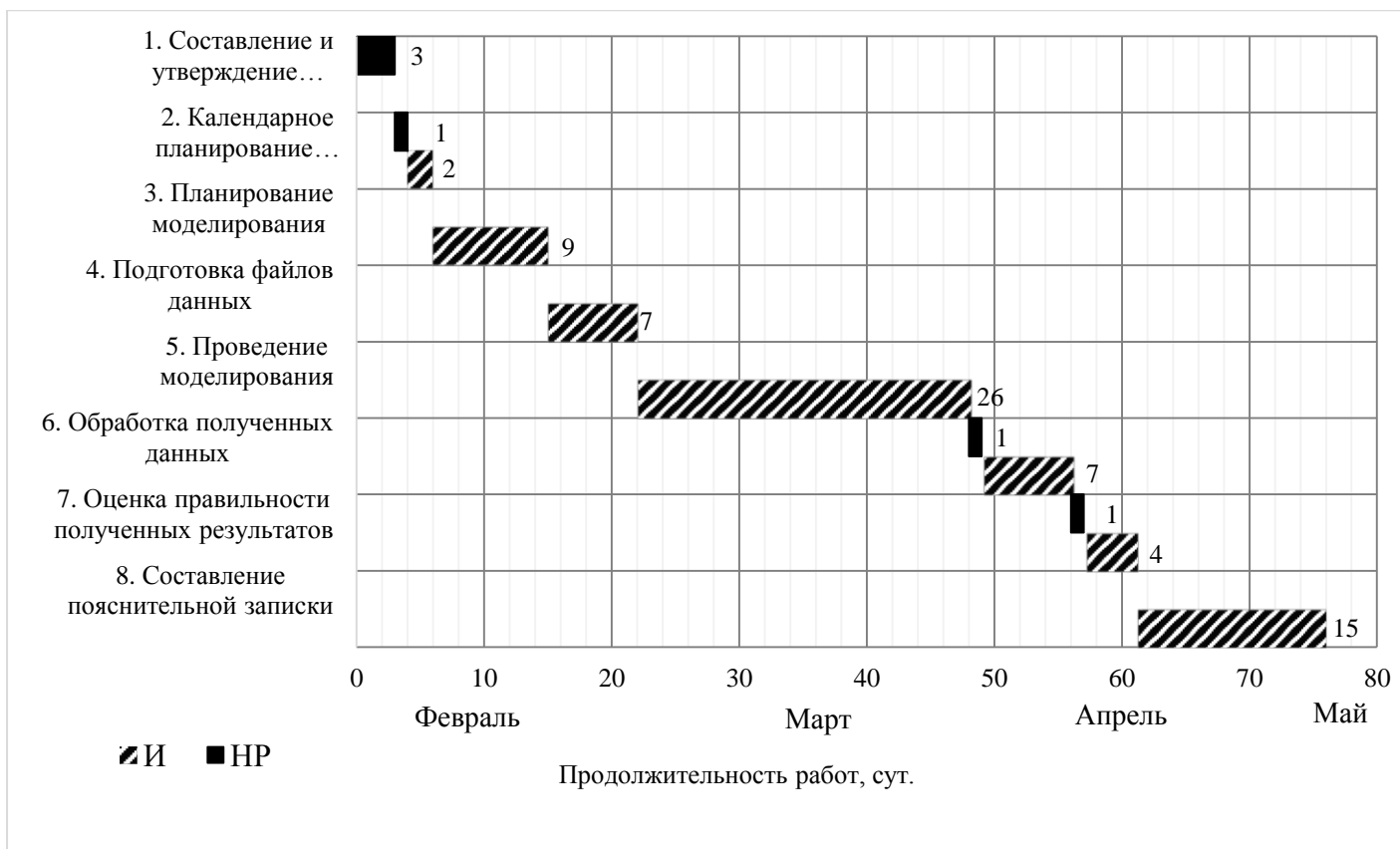


Рисунок 4.1 – Диаграмма Ганта

Общее число календарных дней, в течении которых выполнялась работа – 76; число календарных дней, в течении которых работал инженер – 70, руководитель – 6.

4.3.3. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовалась группировка затрат по следующим статьям:

- 1) материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- 2) затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- 3) основная заработная плата исполнителей темы;
- 4) дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- 5) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 6) накладные расходы НИР.

4.3.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования

В таблице 4.10 приведены все использованные при выполнении исследования принадлежности, их цена за единицу, количество использованных единиц и общая стоимость затрат.

Таблица 4.10 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей	275	3	825
Картридж для лазерного принтера Cactus CS-P76A, черный	230	1	230
Итого:			1055

4.3.3.2. Расчет амортизации специального оборудования

Какое-либо специальное оборудование для работы дополнительно не закупалось. В данной главе будет осуществляться расчет амортизации оборудования, которое было приобретено еще до начала выполнения работ.

При выполнении работы использовался ПЭВМ – ноутбук Asus X550LB и ПО по расчету тепловых полей (Примем срок полезного использования 1 год). Срок полезного использования данного ноутбука по паспорту составляет 4 года. Количество рабочих дней, в течении которых использовался ноутбук составляет 60. Все данные и результаты приведены ниже.

Рассчитаем норму амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 4 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{4} = 0,25 \quad (4.6)$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot P}{365} \cdot d = \frac{0,25 \cdot 33199}{365} \cdot 60 = 1364 \text{ руб.} \quad (4.7)$$

Аналогичные расчеты для ПО:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{1} = 1 \quad (4.8)$$

$$A = \frac{H_A \cdot P}{365} \cdot d = \frac{1 \cdot 1800}{365} \cdot 40 = 197 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

Полученные данные занесем в таблицу 4.11:

Таблица 4.11 – Амортизация

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Срок использования в рамках исслед.,	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Амортизация, руб.
1	Ноутбук ASUS X550LB	1	4	60	33,199	1364
2	ПО	1	1	40	1800	197
Итого:				1561 руб.		

4.3.3.3. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей

темы

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

Полная заработная плата включает в себя основную и дополнительную (12-20 % от $Z_{осн}$):

$$Z_{зн} = Z_{осн} + Z_{дон}, \quad (4.10)$$

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

$Z_{дон}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.11)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D}, \quad (4.12)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

Должностной оклад работника за месяц:

$$Z_M = Z_{TC} (1 + k_{np} + k_D) k_p, \quad (4.13)$$

где Z_{TC} – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3;

k_D – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;

k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Проведем все расчеты и занесем данные в таблицу 4.13. В таблице 4.12 представлен годовой баланс рабочего времени для 6-дневной рабочей недели.

Таблица 4.12 – Рабочее время исполнителей темы

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

Таблица 4.13 – Заработная плата исполнителей темы

Исполнители НИ	$Z_{ТС}$, руб	k_{np}	k_d	k_p	Z_M , руб.	$Z_{дон}$,руб	T_p , раб.дн.	$Z_{осн}$,руб.
Руководитель	25500	0,3	0,2	1,3	49725	2060	6	12361
Инженер	2200	-	-	1,3	2860	119	70	8295
Итого:								20657

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{дон} = Z_{осн} \cdot k_{дон} = 0,15 \cdot 12361 = 1854 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

– для инженера:

$$Z_{дон} = Z_{осн} \cdot k_{дон} = 0,15 \cdot 8295 = 1244 \text{ руб.}, \quad (4.15)$$

где $k_{дон}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (принимается равным 0,15).

4.3.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{дон}) = 0,3(12361 + 1854) = 4265 \text{ руб.} \quad (4.16)$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{дон}) = 0,3(8295 + 1244) = 2862 \text{ руб.}, \quad (4.17)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2021 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.3.3.5. Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д.

Рассчитывается общая сумма накладных расходов следующим образом:

$$Z_{накл} = (1561 + 1055 + 20657 + 3098 + 7127) \cdot 0,16 = 5360 \text{ руб.}, \quad (4.18)$$

где $k_{нр} = 0,16$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Ниже приведена таблица 4.14, в которой указаны все статьи затрат и их величина.

Таблица 4.14 – Статьи затрат НИР

Статьи затрат.							
Амортизация	Материальные затраты	Осн. зар. плата	Доп. зар. плата	Отчисления на соц. нужды	Итого. Без наклад. расх.	Накладные расходы	Итого. бюджет. стоим.
1561	1055	20657	3098	7127	33498	5360	38858

* – цифры приведены в рублях.

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

Рассчитаем для определения эффективности исследования интегральный показатель эффективности научного исследования, путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

В качестве аналогов рассмотрим варианты исполнения исследования с использованием разных ЭВМ для проведения только моделирования:

1) Использование стационарного ПЭВМ А6100 (А6366LNi): Pentium Gold G5400/4 Гб/1 Тб/UHD Graphics 610/DVDRW/Win10 Home, стоимостью 30800 руб., Монитор HP 19ка за 4099 руб., клавиатура + мышь 700 руб. (Срок полезного использования 4 года, в рамках исследования – 60 дней, как у ноутбука, Исп. 2).

2) Использование виртуального сервера для расчетов. Стоимость аренды сервера с подходящими характеристиками – 579 руб./месяц (Срок использования 60 дней, Исп. 3).

Таблица 4.15 – Сравнение статей затрат текущего и конкурентных вариантов исполнения

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		
		Текущее исслед.	Исп.2	Исп.3
1	Материальные затраты НИР	1055	1055	1055
2	Амортизация	1561	1660	1355
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	20657	20657	20657
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	3098	3098	3098
5	Отчисления во внебюджетные фонды	7127	7127	7127
6	Накладные расходы	5360	5360	5360
Бюджет затрат НИР		38858	38957	38652

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (4.19)$$

где $I_{финр}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{текущ.ис.} = 38858$ руб, $\Phi_{исп.2} = 38957$ руб, $\Phi_{исп.3} = 38652$ руб.

$$I_{финр}^{тек.исп.} = \frac{\Phi_{тек.исп.}}{\Phi_{max}} = \frac{38858}{38957} = 0,997; \quad (4.20)$$

$$I_{финр}^{исп.2} = \frac{\Phi_{исп.2}}{\Phi_{max}} = \frac{38957}{38957} = 1; \quad (4.21)$$

$$I_{финр}^{исп.3} = \frac{\Phi_{исп.3}}{\Phi_{max}} = \frac{38652}{38957} = 0,992. \quad (4.22)$$

Как видно из рассчитанных интегральных показателей, используемый вариант является средним, между двумя аналогами.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР I_{pi} определен путем сравнительной оценки их характеристик,

распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.16).

Таблица 4.16 – Интегральные показатели вариантов исполнения

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текуще исслед.	Исп.2	Исп.3
1. Сроки выполнения работы	0,3	5	5	5
2. Стабильность работы	0,3	5	5	3
3. Технические характеристики	0,4	4	4	5
Итого:	1	4,6	4,6	4,4

Расчет интегрального показателя для исследования:

$$I_{p1} = 0,3 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,4 \cdot 5 = 4,6; \quad (4.23)$$

$$I_{p2} = 0,3 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,4 \cdot 5 = 4,6; \quad (4.24)$$

$$I_{p3} = 0,3 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,4 \cdot 5 = 4,4; \quad (4.25)$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}} \quad (4.26)$$

$$I_{тек.исп.} = \frac{4,6}{0,997} = 4,6; \quad I_{исп.2} = \frac{4,6}{1} = 4,6; \quad I_{исп.3} = \frac{4,4}{0,992} = 4,4. \quad (4.27)$$

Далее приведена сравнительная таблица интегральных показателей (табл. 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнение интегральных показателей вариантов исполнения

№ п/п	Показатели	Текущее исслед.	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,997	1	0,992
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	4,6	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	4,6	4,6	4,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1	0,96

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективными является вариант 1 (текущее исслед.) и 2.

4.5. Выводы по разделу

В результате работы над разделом были рассмотрены потенциальные потребители результатов исследования и проведен анализ коммерческого потенциала разработки, был составлен календарный план-график НИР, рассчитан ее бюджет, а также определена ресурсная, финансовая эффективность в сравнении с аналогичными вариантами исполнения.

Анализ потенциала разработки показал, что в сравнении с конкурентным, используемое решение имеет больше преимуществ, которые можно увидеть в табл. 4.2. В результате SWOT-анализа (табл. 4.3) были определены сильные и слабые стороны, возможности и угрозы исследования, а также их взаимосвязь.

При планировании НИР были обозначены основные этапы, содержание и трудоемкость работ, определены роли исполнителей (табл. 4.8). Для каждой работы в рамках исследования была указана продолжительность в рабочих и календарных днях и составлена диаграмма Ганта (табл. 4.9, рис. 4.1).

В результате расчета бюджета НИР были определены основные статьи затрат: амортизация, материальные затраты, основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на социальные нужды и накладные расходы. Результаты расчета приведены в табл. 4.14.

В последней главе раздела были рассчитаны показатели финансово- и ресурсоэффективности. На основе полученных показателей среди всех рассмотренных аналогов был сделан вывод о том, что используемый вариант исполнения исследования как минимум не уступает другим.

Раздел выполнен на основе методики из пособия [26].

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

5.1. Введение для раздела

Задачей данной ВКР является применение численного моделирования для определения параметров высокоинтенсивных пучков ионов азота и расчета температурных полей в мишенях из разных материалов под их воздействием.

В данном разделе рассматриваются правовые и организационные вопросы безопасности, в частности организацию рабочего места, также указываются правовые нормы трудового законодательства. Помимо этого, определяются опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть при работе исследователя и эксплуатации ПЭВМ, основные источники загрязнения окружающей среды и способы снижения их воздействия. Помимо выше перечисленных пунктов проводится анализ возможных ЧС и плана действий в случае их возникновения. Лаборатория располагается на территории города Томска, по адресу г. Томск, проспект Ленина, д.2 стр.4, корпус 11, кабинет 319.

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

5.2.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.

Правовые нормы трудового законодательства, относительно работы в описанных выше условиях регулируются таким документом как, трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021) [27]. Таким образом, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, а режим работы предусматривает продолжительность рабочей недели, в данном случае шестидневная рабочая неделя. Как следствие, применяется следующий режим работы: с понедельника по пятницу 7 часов в день, в субботу 5 часов в день.

Оплата труда производится в размере не меньше МРОТ, и нормы труда установлены в соответствии с уровнем техники, технологии, организации производства и труда.

5.2.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

Рациональная планировка рабочего места должна обеспечивать: наилучшее размещение орудий и предметов труда, не допускать общего дискомфорта, уменьшать утомляемость работника, повышать его продуктивность труда.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.» [28], должны быть соблюдены требования о размере зоны досягаемости моторного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях, высоты рабочей поверхности, пространства для ног и рабочего сиденья. Отрегулировано размещение средств отображения информации, именно мониторов ПЭВМ: под углом $\pm 15^\circ$ от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом $\pm 15^\circ$ от сагиттальной плоскости.

5.3. Производственная безопасность.

5.3.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

В ходе анализа рабочего места при проведении исследований было выявлено, что в лаборатории возможно наличие таких вредных факторов, как недостаточная освещенность рабочего помещения, как естественным, так и искусственным освещением. Так же возможны нарушения температуры, давления, влажности и конвекции воздуха. В дополнение потенциальное превышение уровня шума от рабочего компьютерного оборудования так же

может послужить вредом. В качестве опасных факторов могут быть электромагнитное излучение, повышенное значение напряжения в электрической цепи. Все вышеописанные факторы объединены в таблице 5.1 и классифицированы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 [29].

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ		Нормативные документы
	Моделирование	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	1. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [30]
2. Превышение уровня шума	-	+	2. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [31]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	3. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [32]
4. Электромагнитное излучение	+	+	4. ГОСТ Р 50948-2001 Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности [33]
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи.	+	+	5. ГОСТ 12.1.038-82 с изм. от июня 2001 г. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [34]

Рассмотрим факторы таблицы 5.1 подробнее.

5.3.1.1. Отклонение показателей микроклимата.

Причиной отклонения от норм микроклиматических условий могут быть аномальные природные условия, такие как аномальные морозы или жара. Так же несоблюдение защитных мер: попадание прямых солнечных лучей, отсутствие вентиляции воздуха в помещении, повышение влажности воздуха или перегрев рабочих поверхностей в помещении.

Повышенная влажность воздуха затрудняет терморегуляцию организма, т.к. происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

В таблицах 5.2 и 5.3 представлены оптимальные и допустимые параметры рабочей зоны для различных категорий работ. В нашем случае, категория работ - Па, т.е. работы, связанные с постоянной ходьбой, выполняемые стоя или сидя, но не требующие перемещения тяжестей.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры температуры для рабочей зоны

Период года	Категория работ по уровню энерготрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин	
Холодный	Па (175-232)	17,0-18,9	21,1-23,0	16,0-24,0
Теплый	Па (175-232)	18,0-19,9	22,1-27,0	17,0-28,0

Таблица 5.3 – Оптимальные и допустимые параметры скорости движения воздуха для рабочей зоны

Период года	Категория работ по уровню энерготрат, Вт	Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с		
		Оптимальная	Допустимая на рабочих местах	Оптимальная	для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	Па (175-232)	40-60	15-75	0,2	0,1	0,3
Теплый	Па (175-232)	40-60	15-75	0,2	0,1	0,4

Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года следует применять средства защиты рабочих мест от остекленных поверхностей оконных проемов, чтобы не было охлаждения, а также необходимо установить отопительную систему. В теплый период года необходимо предусмотреть защиту от попадания прямых солнечных лучей. К средствам коллективной защиты можно отнести установки кондиционирования

воздуха, основная задача которых поддерживать параметры воздуха в установленных пределах, для обеспечения надежной работы и комфортных условий для работников.

5.3.1.2. Превышение уровня шума

В нашей научно-исследовательской лаборатории не находится никаких приборов и устройств, создающих шум, который может оказать влияние на здоровье. Так же в помещении отсутствует вентиляционная система, которая могла бы создавать дополнительные шумы. Лаборатория расположена среди учебных комнат, что означает, что в соседних комнатах так же отсутствует производственное оборудование.

Повышенный шум на рабочем месте оказывает вредное влияние на организм работника в целом, вызывая неблагоприятные изменения в его органах и системах. Длительное воздействие такого шума способно привести к развитию у работника потери слуха, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечно-сосудистой, нервной системы и др. При этом специфическим клиническим проявлением вредного действия шума является стойкое нарушение слуха (тугоухость), рассматриваемое как профессиональное заболевание.

Для определения допустимого уровня шума на рабочих местах используется ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности.» [31]. Нормирование шума производится по комплексу показателей с учетом их гигиенической значимости на основании СанПиН 1.2.3685-21 [30]. Принято два метода нормирования: по предельному спектру шума и по интегральному показателю (эквивалентному уровню шума, дБ). Выбор метода зависит от временных характеристик шума. В таблице 5.4 представлены допустимые уровни звукового давления на рабочем месте, согласно [30].

Таблица 5.4 – Допустимые уровни звукового давления на рабочем месте

Назначение территорий	Территории, непосредственно прилегающие к зданиям образовательных организаций							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровень звукового давления, дБ	67	57	49	44	40	37	35	33

В первую очередь следует использовать средства коллективной защиты. По отношению к источнику возбуждения шума коллективные средства защиты подразделяются на средства, снижающие шум в источнике его возникновения, и средства, снижающие шум *на пути его распространения* от источника до защищаемого объекта.

Внутри здания тихие помещения необходимо располагать вдали от шумных так, чтобы их разделяло несколько других помещений или ограждение с хорошей звукоизоляцией.

Снижение шума с помощью звукоизоляции. Для защиты лаборатории от воздействия шума целесообразно применить в качестве средства коллективной защиты (СКЗ) рациональную планировку предприятий и производственных помещений. При проектировании ограждающих конструкций, предназначенных для защиты от шума следует принимать наиболее эффективные по изоляции воздушного шума конструкции – однослойные с пустотами или из бетонов на пористых заполнителях и ячеистых бетонов, или однослойные конструкции с тонкой облицовкой толщиной не более 1,5 см (сухая штукатурка и другие подобные материалы) с воздушным промежутком не менее 4 см. Средства индивидуальной защиты (СИЗ) применяются в том случае, если другими способами обеспечить допустимый уровень шума на рабочем месте не удастся. Однако для работы с ПЭВМ в СИЗ нет необходимости.

5.3.1.3. Отсутствие или недостаток необходимого и искусственного освещения

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

Неудовлетворительное и некачественное освещение утомляет зрение, может стать причиной его снижения, реже слепоты. Плохо освещенные участки рабочего места могут стать причиной травматизма.

В соответствии с СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*» [32] все зрительные работы делятся на 8 разрядов и зависимости от размера объекта различия и условий зрительной работы. Принимаем четвертый разряд зрительной работы (средней точности). Допустимые значения наименьшей освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях в соответствии с выше обозначенным документом, для четвертого разряда зрительной работы приведены в таблице 5.5. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Таблица 5.5 – Нормирование значения освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении

Характер Зрительной работы	Наименьший размер объекта, мм	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различия с фоном	Характер фона	Освещенность, лк	
					Комбинированное	Общее
Средняя точность (4 разряд зрительной работы)	0,5-1,0	а	Малый	Темный	750	300
		б	Малый	Средний	500	200
			Средний	Темный	500	200
		в	Малый	Светлый	400	200
			Средний	Светлый	400	200

Естественного освещения в лаборатории по условиям зрительной работы, как правило, недостаточно, поэтому на рабочих местах оказывается задействованным и искусственное освещение. Оно может быть обеспечено с помощью люминесцентных ламп ЛВ (белого цвета) мощностью 20, 40, 80 Вт. Для рабочих мест с искусственным освещением регламентирована допустимая освещенность, согласно действующим санитарным нормам и правилам СП 52.13330.2016 [32]. Согласно СП 52.13330.2016 газоразрядные лампы приняты в качестве основного источника света. Основными преимуществами таких ламп перед лампами накаливания являются высокая световая отдача - 40-110 лм/Вт, большой срок службы (до 8000-12000 ч), возможность получения светового потока практически с любым спектром. В частности, люминесцентные лампы, рекомендуемые для использования в производственных помещениях, обеспечивают достаточный уровень освещения, сохраняют зрение, снижают утомляемость, повышают работоспособность. Необходимо учитывать, пульсацию светового потока, слепящее действие, а также возникновение стробоскопического эффекта. Для уменьшения коэффициента пульсации люминесцентные лампы включают в разные фазы трехфазной электрической сети.

5.3.1.4. Электромагнитное излучение.

Экран и системный блок ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать значениям в таблице 5.6.

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

Таблица 5.6 – Допустимые уровни параметров электромагнитного излучения

[33]

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- а) увеличение расстояния от источника (экран должен находится на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- б) применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты [33].

5.3.1.5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи.

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие. Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства. Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава. Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта. Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся произвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения.

В таблице 5.7 приведены предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека, которые не должны превышать согласно ГОСТ 12.1.038-82 с изм. от июня 2001 г. [34].

Таблица 5.7 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека

Продолжительность воздействия тока, с	Предельно допустимые значения, не более		Продолжительность воздействия тока, с	Предельно допустимые значения, не более	
	U, В	I, мА		U, В	I, мА
0.01-0.08	550	650	0.6	95	105
0.1	340	400	0.7	85	90
0.2	160	190	0.8	75	75
0.3	135	160	0.9	70	65
0.4	120	140	1.0	60	50
0.5	105	125	Свыше 1.0	20	6

В рабочем помещении осуществляется проведение работ с источниками переменного высокого напряжения. Помещение для работы с высоковольтными источниками должно соответствовать требованиям безопасности: в нем не должны присутствовать токопроводящие полы и источники токопроводящей пыли; относительная влажность не должна превышать 75%, а температура – 35 °С; также необходимо исключить возможность одновременного прикосновения к металлическим заземленным элементам и металлическим корпусом [35].

В этих целях требуется не только обеспечить надлежащую изоляцию токоведущих частей, но и защитить их от разрушения изоляции, заключив проводку в защитную оболочку и закрепив вне путей прохождения персонала [35].

5.4. Экологическая безопасность.

5.4.1. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.

На данном рабочем месте выявлен предполагаемый источник загрязнения окружающей среды, а именно воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке предметов вычислительной техники и оргтехники.

Вышедшее из строя ПЭВМ и сопутствующая оргтехника относится к IV классу опасности и подлежит специальной утилизации. Для оказания

наименьшего влияния на окружающую среду, необходимо проводить специальную процедуру утилизации ПЭВМ и оргтехники, при которой более 90% отправится на вторичную переработку и менее 10% будут отправлены на свалки. При этом она должна соответствовать процедуре утилизации ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов» [36].

В ходе деятельности организация также создает бытовой мусор (канцелярские, пищевые отходы, искусственные источники освещения), который должен быть утилизирован в соответствии с определенным классом опасности или переработан, чтобы не оказывать негативное влияние на состояние литосферы.

5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

5.5.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

Лаборатория расположена в городе Томск с континентально-циклоническим климатом и природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы, несанкционированное проникновение на рабочее место, пожары.

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

Должны быть приняты следующие меры противопожарной безопасности:

- 1) обеспечение эффективного удаления дыма, т.к. в помещениях, имеющих оргтехнику, содержится большое количество пластиковых веществ, выделяющих при горении летучие ядовитые вещества и едкий дым;
- 2) обеспечение правильных путей эвакуации;
- 3) наличие огнетушителей и пожарной сигнализации;
- 4) соблюдение всех противопожарных требований к системам отопления и кондиционирования воздуха.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации (рис. 5.1). План эвакуации представляет собой заранее разработанную схему, на которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации.

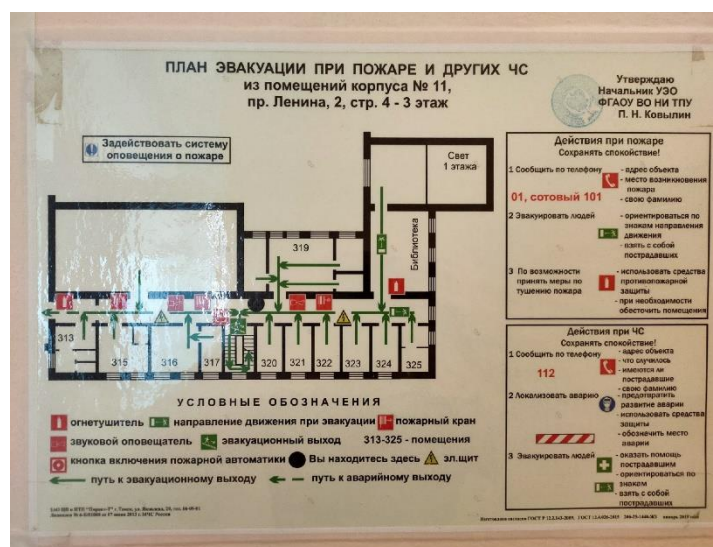


Рисунок 5.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений корпуса №11

Существует порядок действий и правила поведения в случае возникновения пожара:

- 1) Незамедлительно позвонить в аварийную службу или МЧС (112);
- 2) Поставить в известность руководство (дежурного);

3) По возможности принять меры для эвакуации людей и меры для тушения пожара.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы и метели. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные газовые обогреватели с катализатором. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась. Необходимо иметь суточный запас воды на складе, чтобы избежать обезвоживания персонала. В случае перебоев в расписании движения общественного транспорта должен быть предоставлен транспорт служебный.

Возможно несанкционированное проникновение на рабочее место. Угрозы могут быть как ложными, так и действительными, поэтому необходимы меры предосторожности по этому поводу. В качестве мер безопасности приняты следующие действия - установка системы видеонаблюдения и круглосуточной охраны, сохранение конфиденциальной информации о охранной системе. Для защиты от несанкционированного проникновения также должна быть введена пропускная система. Необходимо так же проводить информирование должностных лиц и тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации. Помещение лаборатории закрывается на замок, ведется охрана вахтовым методом. В помещении установлена сигнализация.

5.6. Выводы по разделу

В разделе ВКР социальная ответственность был проведен анализ возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте исследователя. Были предложены превентивные меры и меры безопасности. Так же проведен анализ безопасности предприятия по отношению к экологии и безопасности в случае чрезвычайных ситуаций. В результате анализа было подтверждено, что все необходимые меры для обеспечения безопасности сотрудников в лаборатории приняты, например, все элементы, порождающие шум изолированы. Так же в лаборатории установлены широкие пластиковые окна, которые обеспечивают необходимый уровень освещения и вентиляции воздуха. Установлена

оптимальная система освещения для обеспечения искусственного белого света. В случае ЧС в лаборатории присутствует план эвакуации, огнетушитель. Лаборатория закрывается на сигнализацию и корпус находится под вахтовой охраной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы определены параметры высокоинтенсивных ионных пучков азота. Построено распределение плотности тока для пучков ионов азота. На основании полученных данных были рассчитаны температурные градиенты по глубине и вдоль поверхности для образцов из титана и алюминия, установленных на держателе из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Численным моделированием проведено исследование динамики формирования температурных градиентов по глубине металлических мишеней из Ti и Al в процессе имплантации высокоинтенсивными пучками ионов газа азота в условиях принудительного охлаждения необлучаемой стороны мишени. На основании результатов численного моделирования было показано, что охлаждение необлучаемой стороны образца вносит свой вклад в развитие микроструктуры поверхностных и приповерхностных слоев титана. Однако, реализация используемой системы охлаждения с такими параметрами ионного пучка азота нецелесообразна и будет разумнее производить модификацию поверхностных слоев пучками ионов азота с более низкой мощностью. Это обусловлено изменением зеренной структуры металла при более высоких температурах.

Также на основании полученных результатов модели было показано, что охлаждение необлучаемой стороны образца из алюминия нецелесообразно по причине того, что полученные значения максимальных температур поверхностных слоев достаточно низкие, чтобы формировать глубокий модифицированный слой. Анализируя результат моделирования температурных градиентов было отмечено, что целесообразней использовать пучки более высокой мощности с целью достижения более глубокой модификации поверхностного слоя алюминия.

В результате работы были рассмотрены потенциальные потребители результатов исследования и проведен анализ коммерческого потенциала разработки, был составлен календарный план-график НИР, рассчитан ее бюджет,

а также определена ресурсная, финансовая эффективность в сравнении с аналогичными вариантами исполнения.

Также был проведен анализ возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте исследователя. Были предложены превентивные меры и меры безопасности. Также проведен анализ безопасности предприятия по отношению к экологии и безопасности в случае чрезвычайных ситуаций. В результате анализа было подтверждено, что все необходимые меры для обеспечения безопасности сотрудников в лаборатории приняты. В случае ЧС в лаборатории присутствует план эвакуации, огнетушитель. Лаборатория закрывается на сигнализацию и корпус находится под вахтовой охраной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Poate J. M., Foti G., Jacobson D. C. Surface modification and alloying: by laser, ion, and electron beams. – 2013.
2. See, for instance, Proceedings of the Biennial International Conferences on the Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB) (2016) [Surf. Coat. Technol. 306, Part A (2016)]; Ion Beam Modification of Materials of Materials (IBMM) (2017) [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 409 (2017)].
3. Totten G. E., Funatani K., Xie L. (ed.). Handbook of metallurgical process design. – CRC press, 2004.
4. Hoshiyama Y., Mizobata R., Miyake H. Mechanical properties of austenitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding //Surface and Coatings Technology. – 2016. – Т. 307. – С. 1041-1044.
5. Pant P. et al. A new nitrogen alloying technique-a way to distinctly improve the properties of austenitic steel //Steel research. – 1987. – Т. 58. – №. 1. – С. 18-25.
6. Brown I. G., Galvin J. E., MacGill R. A. High current ion source //Applied Physics Letters. – 1985. – Т. 47. – №. 4. – С. 358-360.
7. Ryabchikov A. I. et al. The Raduga multipurpose ion/plasma source for surface modification of construction materials //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1991. – Т. 59. – С. 124-127.
8. Bugaev S. P. et al. The “TITAN”ion source //Review of scientific instruments. – 1994. – Т. 65. – №. 10. – С. 3119-3125.
9. Gavrilov N. V. et al. Development of technological sources of gas ions on the basis of hollow-cathode glow discharges //Surface and Coatings Technology. – 1997. – Т. 96. – №. 1. – С. 81-88.
10. Wei R. Low energy, high current density ion implantation of materials at elevated temperatures for tribological applications //Surface and Coatings Technology. – 1996. – Т. 83. – №. 1-3. – С. 218-227.

11. Williamson D. L. et al. Microstructure of ultrahigh dose nitrogen-implanted iron and stainless steel //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1991. – T. 59. – C. 737-741.
12. Hutchings R. A review of recent developments in ion implantation for metallurgical application //Materials Science and Engineering: A. – 1994. – T. 184. – №. 2. – C. 87-96.
13. Ryabchikov A. I. et al. Modification of 40X13 steel at high-intensity nitrogen ion implantation //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – T. 1115. – №. 3. – C. 032053.
14. Ryabchikov A. et al. High intensity, low ion energy implantation of nitrogen in AISI 5140 alloy steel //Surface and Coatings Technology. – 2018. – T. 355. – C. 129-135.
15. Ryabchikov A. I. et al. High intensity metal ion beam generation //Vacuum. – 2017. – T. 143. – C. 447-453.
16. Koval T. V. et al. Formation of high intensity ion beams with ballistic focusing //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – T. 927. – №. 1. – C. 012082.
17. Ryabchikov A. I. et al. Low energy, high intensity metal ion implantation method for deep dopant containing layer formation //Surface and Coatings Technology. – 2018. – T. 355. – C. 123-128.
18. Anders A. et al. (ed.). Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition. – New York : Wiley, 2000. – T. 8.
19. Stepanov I. B. et al. Plasma immersion ion charge state and mass spectrometer //Review of scientific instruments. – 2014. – T. 85. – №. 2. – C. 02A733.
20. Ryabchikov A. I. et al. Regularities of plasma-immersion formation of long-pulse high-intensity titanium ion beams //Russian Physics Journal. – 2018. – T. 61. – №. 7. – C. 1338-1346.
21. Miller W. S. et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry //Materials Science and Engineering: A. – 2000. – T. 280. – №. 1. – C. 37-49.

22. Jarry P., Rappaz M. Recent advances in the metallurgy of aluminium alloys. Part I: Solidification and casting //Comptes Rendus Physique. – 2018. – Т. 19. – №. 8. – С. 672-687.

23. Borns R., Whitacre D. Optimizing designs of aluminum suspension components using an integrated approach. – SAE Technical Paper, 2005. – №. 2005-01-1387.

24. Ryabchikov A. I. et al. Microstructure of titanium alloy modified by high-intensity implantation of low-and high-energy aluminium ions //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 391. – С. 125722.

25. Ryabchikov A. I. et al. Surface modification of Al by high-intensity low-energy Ti-ion implantation: Microstructure, mechanical and tribological properties //Surface and Coatings Technology. – 2019. – Т. 372. – С. 1-8.

26. Видяев, И.Г. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына. – Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. –36 с.

27. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021)

28. ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.»

29. ГОСТ 12.0.003-2015 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»

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

31. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности.»

32. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*»

33. ГОСТ Р 50948-2001 «Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности»

34. ГОСТ 12.1.038-82 с изм. от июня 2001 г. «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.»

35. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

36. ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов»