

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии
Кафедра Физико-энергетических установок

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Развитие метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий для реализации гибридных технологий ионной и плазменной обработки материалов

УДК 621.793.1:621.52:621.384.647

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4В	Аверин Никита Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Степанов И.Б.	Д.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	К.ЭКОН.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	К.Ф.-М.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	К.Ф.-М.Н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

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

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

Долматов О.Ю.

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4B	Аверину Никите Сергеевичу

Тема работы:

Развитие метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий для реализации гибридных технологий ионной и плазменной обработки материалов

Утверждена приказом директора (дата, номер)

26.02.2016 № 1618/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

20.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Метод короткоимпульсной плазменно-иммерсионной имплантации
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	– обзор литературы и технической документации, затрагивающих технологии и установки, принципы и методы вакуумно-плазменной обработки и модификации изделий; – определение области применимости метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий; – экспериментальное подтверждение области применения метода; – разработка рекомендаций по применению метода.

Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М. В.
Социальная ответственность	Гоголева Т. С.
Иностранный язык	Ермакова Я. В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Состояние и тенденции развития исследований в области создания оборудования и методов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов	
Методики исследования и оборудование	
Определение области применимости метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Степанов И.Б.	д.т.н.		01.02.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4В	Аверин Никита Сергеевич		01.02.2016

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4B	Аверин Никита Сергеевич

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерно-технический контроль и регулирование

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Матрица SWOT
3. Иерархическая структура работ
4. Календарный план проекта
5. Бюджет проекта
6. Определение ресурсоэффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	К.ЭКОН.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4B	Аверин Никита Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4B	Аверин Никита Сергеевич

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерно-технический контроль и регулирование

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	– вредных факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, электромагнитные поля); – опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной природы)
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	электробезопасность, пожаробезопасность, требования при работе на ПЭВМ
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– воздействие на организм человека; – приведение допустимых норм; – предлагаемые средства защиты.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4B	Аверин Никита Сергеевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 102 страницы, 43 рисунка, 27 таблиц, 26 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: плазма, ионная имплантация, осаждение, очистка, подложка, напряжение смещения, короткий импульс.

Объектом исследования является метод высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий.

Цель работы заключается в разработке методики применения высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий для модификации свойств материалов.

Практическая польза и новизна заключаются в улучшении функциональных свойств, повышении энергетической эффективности и экологической безопасности при применении плазменной технологии в области модификации материалов.

Результаты, полученные в ВКР могут быть применены в плазменных технологиях очистки и модификации различных металлических изделий, для создания материалов и устройств микро- и нанoeлектроники, для производства режущих инструментов, в машиностроении и строительстве, в создании биомедицинской техники.

Оглавление

Введение.....	11
1 Состояние и тенденции развития исследований в области создания оборудования и методов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов	13
1.1 Методы ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов	13
1.1.1 Очистка поверхности.....	14
1.1.2 Ионная имплантация.....	15
1.1.3 Осаждение покрытий.....	18
1.2 Оборудование для реализации методов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов.	19
1.2.1 Генератор плазмы.....	20
1.2.2 Ионные источники	22
1.2.3 Плазменный фильтр.....	24
1.2.4 Генератор короткоимпульсного высокочастотного напряжения	26
1.2.5 Вакуумная система и система откачки	27
2 Методики исследования и оборудование	29
2.1 Комплексная установка для реализации гибридных технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов.	29
2.2 Оборудование и методики экспериментальных исследований параметров плазмы и ионных пучков.....	31
2.3 Оборудование и методы исследования элементного состава и физико-механических свойств поверхностных слоев материалов	32
3 Определение области применимости метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий.....	36

3.1 Физическая модель	36
3.2 Схема эксперимента.....	40
3.3 Определение области применения метода	42
4. Методы реализации гибридных технологий ионной и плазменной обработки материалов с использованием метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий	48
4.1 Подготовка экспериментальных образцов	48
4.2 Очистка поверхности.....	51
4.3 Ионная имплантация.....	52
4.4 Формирование покрытий	53
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 63	
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	64
5.1.2 SWOT-анализ.....	64
5.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	68
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	68
5.2.2 Контрольные события проекта.....	70
5.2.3 План проекта.....	71
5.3 Бюджет научно-технического исследования	72
5.3.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	72
5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	74
5.3.2.1 Заработная плата исполнителей темы.....	75
5.3.2.2 Дополнительная заработная плата	76
5.3.2.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	77
5.3.2.4 Накладные расходы	78

5.3.2.5 Контрагентные расходы	79
5.3.2.6 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта	79
5.4 Организационная структура проекта	80
5.4.1 Матрица ответственности	81
5.4.2 Определение интегрального показателя эффективности	83
6 Социальная ответственность	87
6.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории	87
6.2 Требования к ПЭВМ и организация работы	88
6.2.1 Организационные мероприятия.....	88
6.2.2 Технические мероприятия.....	89
6.2.3 Условия безопасной работы.....	91
6.3 Электробезопасность	93
6.4 Пожарная и взрывная безопасность	95
Заключение	98
Список публикаций студента.....	99
Список использованных источников	100
Приложение А	103
Приложение Б.....	122

Введение

Модификация свойств материалов пучками заряженных частиц и плазменными потоками являются важной научно технической задачей, решение которой направлено на повышение эксплуатационных характеристик материалов и изделий, работающих в экстремальных условиях. Среди способов модификации свойств поверхности материалов широкое распространение получили методы ионной имплантации и плазменного осаждения покрытий.

Сегодня направление развития ионных и плазменных методов обработки материалов имеют следующие тенденции:

- создание высокопроизводительного автоматизированного оборудования, благодаря которому можно реализовать процессы модификации изделий и материалов с наименьшими энергетическими затратами;
- создание поверхностных слоев материалов с уникальными эксплуатационными свойствами;
- коммерциализация результатов научно-исследовательских решений в промышленности.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в определении области применения высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий для модификации свойств материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ литературы и технической документации, затрагивающих технологии и установки, принципы и методы вакуумно-плазменной обработки и модификации изделий;
- определение области применения метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий;
- экспериментальное подтверждение области применения метода;

– разработка рекомендаций по применению метода.

Актуальность работы заключается в том, что модификация поверхностных слоев материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы представляет собой одно из важнейших направлений развития науки и техники. Представленный в работе метод повышает эффективность технологии ионно-плазменной модификации материалов, применяемых в микроэлектронике, производстве режущих инструментов, биомедицине.

Объект исследования – метод высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий.

Предмет исследования – гибридные технологии ионной и плазменной обработки материалов.

Практическая польза и новизна заключаются в повышении энергетической эффективности при применении плазменной технологии в области модификации материалов.

Результаты, полученные в ВКР могут быть применены в плазменных технологиях очистки и модификации различных металлических изделий, для создания материалов и устройств микро- и нанoeлектроники, для производства режущих инструментов, в машиностроении и строительстве, в создании биомедицинских изделий и материалов.

1 Состояние и тенденции развития исследований в области создания оборудования и методов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов

1.1 Методы ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов

Методы ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов берут свое начало в 70-х годах XX-века. Применение этих методов позволяют существенно изменить физико-химические, механические, электрические и магнитные свойства модифицируемых материалов, которые невозможно получить другими традиционными методами [1].

Применение плазменной модификации материалов в вакууме предоставляет возможность создавать и внедрять эффективные технологические процессы в различных областях производства, таких как микроэлектроника, производство режущего инструмента, машиностроение и строительство, производство биомедицинских изделий и материалов.

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие методы ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов: ионная имплантация, включая плазменно-иммерсионный режим формирования плазменных потоков и ионно-плазменное осаждение различных функциональных покрытий.

Ионные технологии обработки материалов включают в себя следующие режимы: ионная имплантация, распыление, осаждение покрытия. На рисунке 1 изображена зависимость режимов обработки материала от энергии ионов.



Рисунок 1 – Зависимость режимов обработки материала от энергии ионов

Распыление позволяет производить предварительную подготовку модифицируемого изделия – очистку его поверхности.

Режим ионной имплантации позволяет внедрить заданное количество практически любого химического элемента из периодической таблицы на строго заданную глубину. Таким образом появляется возможность получать композиционные материалы с уникальными структурами и свойствами.

Благодаря нанесению покрытий формируется тонкий слой (пленка) на поверхности изделия [2].

1.1.1 Очистка поверхности

Чтобы избавить подложку от окисленной пленки и других загрязнений производят очистку поверхности. Проведение предварительной очистки приводит к увеличению адгезии покрытий с поверхностью обрабатываемого материала [3].

Для очистки обычно применяются, как газовые, так и металлические ионы. Рабочими газами являются: аргон, ксенон, гелий, неон, азот и т.д. При применении металлических ионов, зачастую обработку производят ионами из осаждаемого материала.

При ионной очистке важную роль играют следующие параметры: энергия и вид ионов, вакуумные условия. Эффективность распыления растет с увеличением массы и энергии ионов. При отсутствии должных вакуумных

условий, происходит возникновение трудно распыляемых соединений, за счет взаимодействия молекул остаточного газа с бомбардирующими ионами, либо атомами подложки. Также немаловажным параметром является длительность проведения очистки, поскольку зачастую происходит нагрев поверхности, с образованием повреждений. В следствие этого, очистку производят импульсно, для того, чтобы подложка успевала остыть, а величину тока на подложку подбирают такой, чтобы исключить образование микродуг на ней [3].

1.1.2 Ионная имплантация

Ионная имплантация основана на внедрении (имплантации) в твердое тело ускоренных ионизированных атомов и молекул. Энергия имплантируемых ионов может изменяться в диапазоне от нескольких электронвольт до килоэлектронвольт, что оказывает существенное влияние на глубину внедрения имплантируемого материала.

Для ионной имплантации характерны: высокая чистота, возможность контроля количества вводимых атомов примеси, воспроизводимость параметров метода, отсутствие зависимости от пределов химической растворимости, а также от температуры и концентрации материала примеси в поверхностных слоях кристалла модифицируемого материала [1].

Ионная имплантация реализуется с помощью автономного ионного источника, либо с помощью плазмы, в которую погружен модифицируемый образец.

На рисунке 2 представлена схема ионной имплантации с автономным ионным источником, на котором видно, что процесс ионной имплантации осуществляется направленным пучком ионов, образованным источником, на модифицируемый материал (подложку).

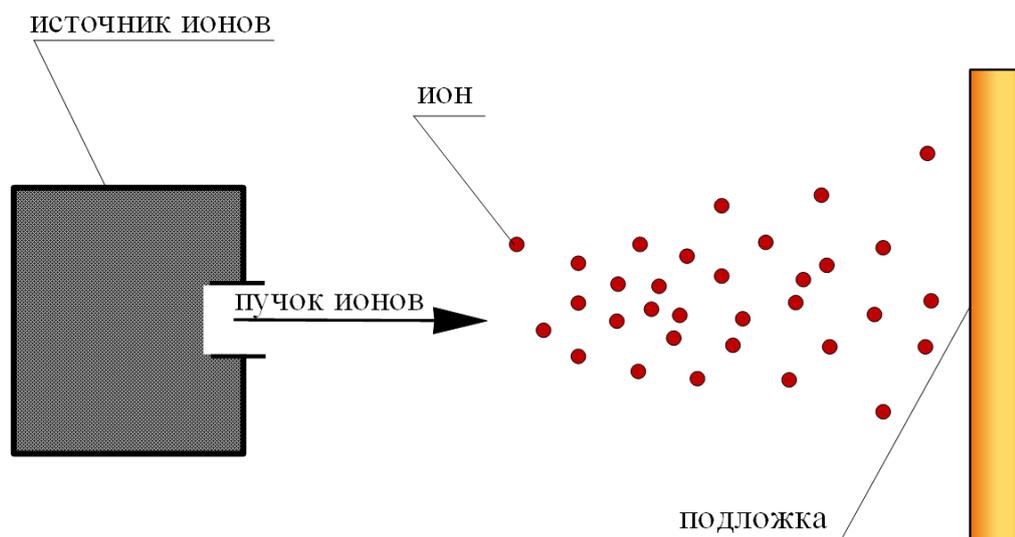


Рисунок 2 – Схема ионной имплантации с автономным ионным источником

Метод ионной обработки, в котором реализовано погружение обрабатываемого образца в плазму и подача на него отрицательного потенциала смещения, называется плазменно-иммерсионная ионная имплантация. Этот метод имеет некоторые преимущества по сравнению с обычной ионной имплантацией, такие как: равномерная имплантация ионов по всей поверхности детали сложной геометрической формы и простота реализации технологического процесса.

Плотность ионного потока в плазменно-иммерсионном методе находится в диапазоне от 10 до 500 мА/см², а энергия ионов от 100 эВ до 100 кэВ [1, 4]. Схема установки для плазменно-иммерсионной имплантации приведена на рисунке 3.

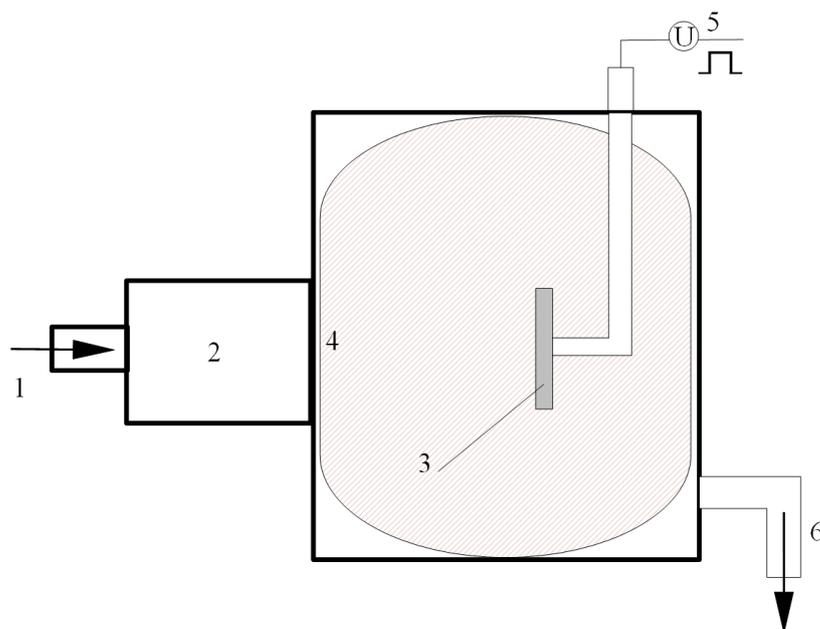


Рисунок 3 – Схема установки плазменно-иммерсионной ионной, где: 1 – напуск газа, 2 – источник плазмы, 3 – подложка, 4 – плазма, 5 – высоковольтный импульсный источник напряжения, 6 – вакуумный насос

При реализации данного метода используется металлическая плазма или плазма различных газов, которая образуется посредством формирования дугового разряда. Для избегания примесей посторонних элементов используют вакуумную камеру с вакуумом. В вакуумной камере находится подложкодержатель с образцом, который необходимо модифицировать. Камера заполняется плазмой, и подложка оказывается погруженной в нее. Далее, за счет подачи отрицательного потенциала смещения на подложкодержатель происходит ускорение ионов из плазмы с последующей их имплантацией на поверхность модифицируемого материала [1].

Плазменно-иммерсионная ионная имплантация реализуется с применением постоянного, либо импульсно-периодического потенциала смещения, который подается на подложку с изделием [5].

В основном используют импульсное напряжение смещения по ряду причин:

- предотвращение образования микродуг на поверхности подложки, ведущих к образованию повреждений осаждаемого покрытия;
- возможность обработки детали сложной геометрической формы;
- энергоэффективность систем питания, компактные
- возможность выбора режима обработки;
- возможность обработки диэлектрических поверхностей [6].

1.1.3 Осаждение покрытий

Одним из перспективных направлений создания долговечных и надежных деталей является нанесение функциональных покрытий. Функциональные покрытия позволяют улучшить коррозионные свойства, повысить износостойкость.

В плазменно-иммерсионной ионной имплантации применяется осаждение покрытий. Под осаждением покрытий понимается метод нанесения тонких пленок, характеризующийся конденсацией на поверхности изделий компонентов паровой или газовой формы, в условиях ионной обработки [7].

Вакуумно-дуговое нанесение покрытий (катодно-дуговое осаждение) – это физический метод нанесения покрытий (тонких плёнок) в вакууме, путём конденсации на подложку (изделие, деталь) материала из плазменных потоков, генерируемых на катоде-мишени в катодном пятне вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала электрода [8].

Вакуумная дуга – это сильноточный и низковольтный электрический разряд, который образуется между двумя металлическими поверхностями в вакууме. Источником плазменных струй является катодное пятно, которое образуется в результате концентрации всей мощности заряда в данной области катода. В дальнейшем, в результате взрывоэмиссионного процесса, происходит распространение материала катода в окружающее пространство. Направление плазмы можно коррелировать посредством наложения электромагнитного поля [8].

Дуговым разрядам свойственны большие токи, примерно $1-10^5$ А.

– вакуумная дуга. Это дуга с катодными пятнами, которая зажигается между электродами, находящимися в вакууме, но горит в плотных металлических парах электрода, которыми немедленно заполняется разрядный промежуток вследствие сильной эрозии и испарения электродов.

Вакуумная дуга обладает следующими параметрами:

- концентрация частиц: $n \sim 10^{17}-10^{20}$ см⁻³;
- степень ионизации: $\alpha \sim 10-100\%$;
- температура электронов: $T_e = 1-2$ эВ;
- температура тяжелых частиц: $T = 0,5-2$ эВ [9].

1.2 Оборудование для реализации методов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов

Гибридные технологии подразумевают реализацию процесса обработки материала в условиях отдельного или совместного воздействия на поверхность потоками плазмы и ионными пучками. Комбинирование технологий, прежде всего, необходимо для расширения возможности решения широкого спектра задач в области изменения структур материалов и их эксплуатационных характеристик.

В состав технологического комплекса обычно входит: источник ионов, генератор плазмы, система очистки от микрокапельной фракции (МКФ), вакуумная камера, система откачки (механический форвакуумный насос, диффузионный паромасляный насос), система напуска газа, система охлаждения, электрическая часть (генераторы напряжений, блок управления насосами) [5].

1.2.1 Генератор плазмы

В плазменно-иммерсионной ионной имплантации источником ионов является плазма, которая может быть газовая, либо металлическая. Генератор металлической плазмы представлен на рисунке 4.

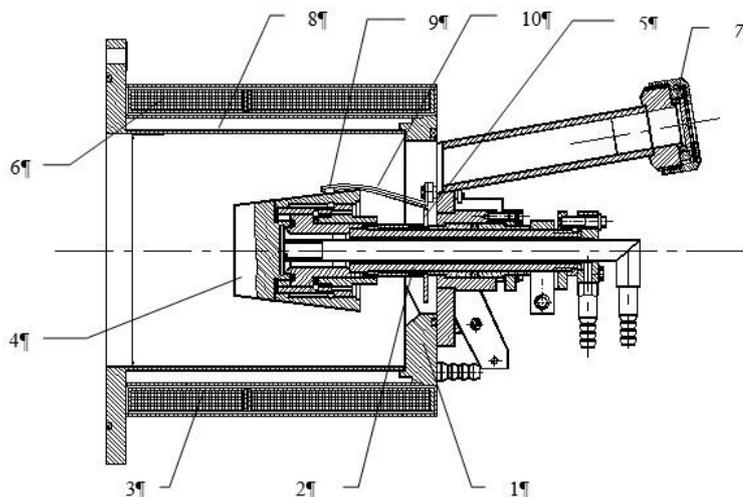


Рисунок 4 – Схема вакуумно-дугового генератора плазмы, где 1– корпус, 2 – держатель, 3 – защитный кожух, 4 – катод, 5 – экран, 6 – катушки, 7 – смотровое окно, 8 – анод, 9 – токоограничивающий элемент, 10 – поджигающий электрод

Для образования электронной эмиссии необходимо обеспечить выход электронов из материала катода, посредством подачи энергии от внешнего источника, которая будет равна работе выхода электрона из материала. Обычно электронную эмиссию получают посредством нагрева катода. Поджигающим электродом 10 инициируется вакуумная дуга между катодом 4 и анодом 8, которая в дальнейшем приводит к образованию катодных пятен на катоде с дальнейшим испарением материала катода.

В качестве материала катодов обычно используют: Zn, Cd, Pb, Ni, Al, Mg. В качестве анода, обычно, может выступать либо электрод, либо стенки вакуумной камеры [5].

Вакуумно-дуговой генератор плазмы обладает следующими характеристиками:

- диаметр катода 60 мм;
- ток разряда 50-300 А;
- напряжение разряда 20-40 В;
- магнитное поле катушек $> 100 \text{ Э (Гс)}, 10^{-2} \text{ Т [10]}$.

Ионизация газа в камере происходит благодаря эмиссии электронов, которые способствуют потере электронов атомов или молекул вещества, превращая их в ионы. Таким образом, испускаемые катодом электроны являются инициаторами ионизации газа, тем самым образуя плазму, которая заполняет объем камеры [11].

Система генерации газовой плазмы представлена на рисунке 5 и состоит из термокатода 7 в виде проволоки из вольфрама, закрепленной на медных держателях 1, охлаждаемых водой. Термокатод расположен внутри цилиндрического полого катода 6, который сделан из нержавеющей стали. Термокатод и полый катод соединены между собой электрически. Образованный комбинированием полого и термокатода катодный узел разрядной системы помещен в продольное магнитное поле, создаваемое соленоидом 8. Рабочий газ (аргон, азот) подается в катодную полость через отверстие подачи газа 2. Катодный фланец 3 крепится к корпусу 5 плазмогенератора через изолятор 4. В свою очередь корпус плазмогенератора крепится на вакуумной камере – полом аноде газового разряда посредством фланцевого соединения и соединен с ней электрически. Для облегчения зажигания разряда в катодную полость вводится поджигающий электрод 10 [12].

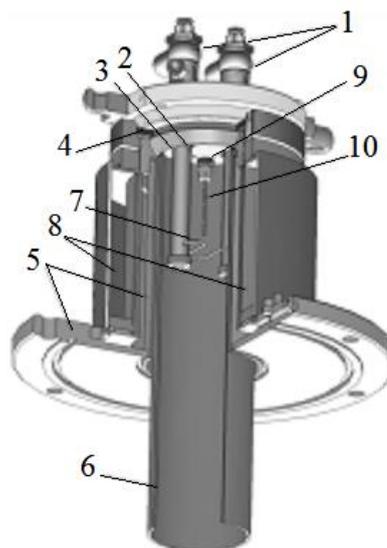


Рисунок 5 – Генератор газовой плазмы «ПИНК», где: 1 – держатель термокатода, 2 – напуск газа, 3 – катодный фланец, 4 и 9 – изоляторы, 5 – корпус, 6 – полый катод, 7 – термокатод, 8 – соленоид, 10 – поджигающий электрод

1.2.2 Ионные источники

Ионный источник – это устройство, для получения потока ионов, скорость направленного движения которого много больше тепловых скоростей самих ионов.

Источником ионов является Радуга-5, изображенная на рисунке 6, принцип действия которой основан на непрерывной генерации плазмы ВДР с импульсно-периодическим или непрерывным формированием ионного пучка. На рисунке 7 изображена схема генератора плазмы.

Принцип действия источника основан на непрерывной генерации плазмы посредством вакуумно-дугового разряда. Инициирование разряда происходит за счет подачи напряжения амплитудой 12 кВ. Сформированная между катодом 10 и поджигающим электродом 9 плазма распространяется в направлении анода 11. В дальнейшем ускоряющей сеткой 1 формируется поток ионов.



Рисунок 6 – Внешний вид источника «Радуга-5»

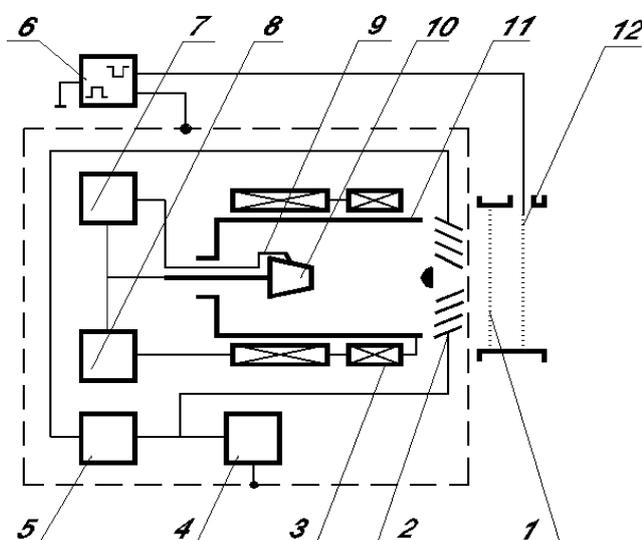


Рисунок 7 – Структурная схема источника «Радуга-5»: 1 – ускоряющая сетка, 2 – ПФ, 3 – катушки с током, 4 и 5 – источники питания ПФ, 6 – генератор импульсов ускоряющего напряжения, 7 – блок поджига, 8 – источник питания ВДР, 9 – поджигающий электрод, 10 – катод, 11 – анод, 12 – сетка для отсечки плазменных электронов

Данный источник генерирует плазму посредством непрерывного вакуумно-дугового разряда. Ток дуги в районе 90-145 А. В результате ионизации получаются ионы с зарядом 1-3. Амплитуда ускоряющего напряжения до 40 кэВ. Максимальная амплитуда тока ионов, полученных данным источником, 2А [13, 14, 15].

1.2.3 Плазменный фильтр

Поскольку катодное пятно является также источником расплавленных капель и твердых частиц, что приводит к загрязнению поверхности модифицируемого материала, используются различные фильтры от микрокапельных фракций (МКФ).

Решение задачи уменьшения, а в ряде случаев полного устранения МКФ в плазменном потоке и в структуре формируемых покрытий реализуется в двух основных направлениях:

1. организация условий функционирования вакуумно-дугового разряда (ВДР) и выбором режимов ионно-плазменной и ионно-лучевой обработки поверхности материалов:

- импульсный режим генерации плазмы, при длительности разряда до нескольких сотен мкс;
- формирование условий быстрого перемещения катодного пятна;
- увеличение площади поверхности катода;
- уменьшение коэффициента эрозии катода, например, в случае формирования в поверхностном слое нитридных соединений;
- при формировании вблизи поверхности обрабатываемой мишени отрицательного потенциала;
- нагрев нагрее подложки;
- использовании непрерывного ВДР с распределенным разрядом на горячем ($> 10^3$ К) катоде;
- использование цилиндрического анода в виде скрученной спирали из трубки круглого сечения;
- применение порошкового катода;

2. Создание специальных устройств очистки плазмы – плазменных фильтров (ПФ) [10].

Одним из самых распространенных плазменных фильтров для вакуумно-дуговых систем является аксиально-симметричный плазменный фильтр

жалюзийного типа, изображенный на рисунке 8. На рисунке 9 представлена схема плазменного фильтра жалюзийного типа [16].



Рисунок 8 – Плазменный фильтр жалюзийного типа

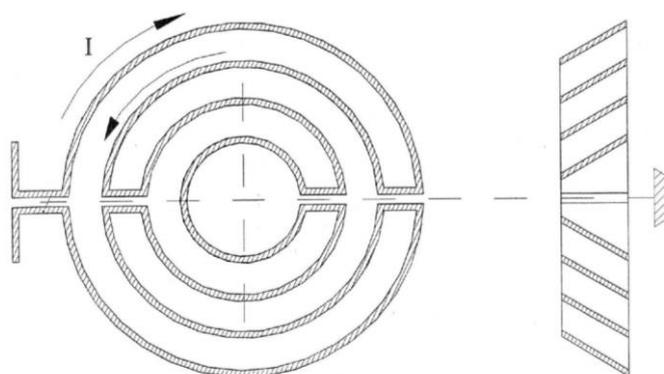


Рисунок 9 – Схема плазменного фильтра жалюзийного типа

Применение их обусловлено тем, что им обеспечивается сохранение распределения плотности ионного тока из плазмы на выходе из фильтра. Расположение ПФ схеме с вакуумно-дуговым генератором показано на рисунке 10 [5].

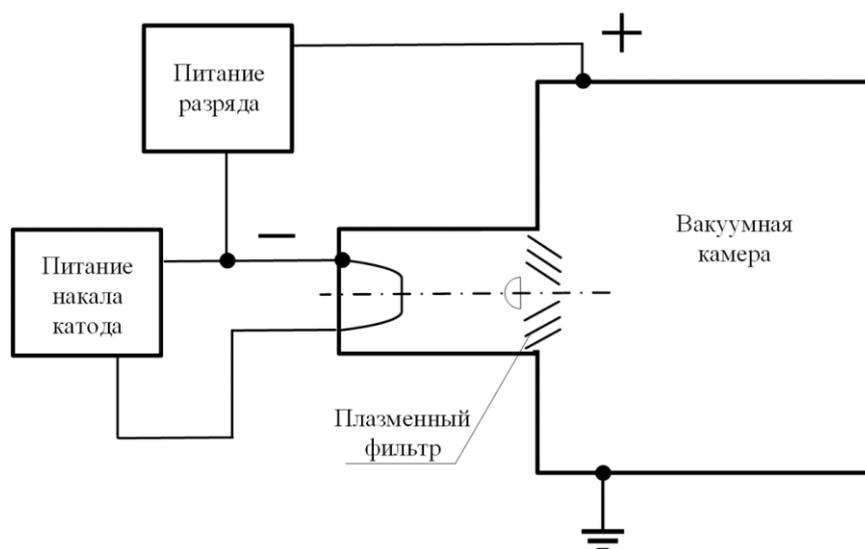


Рисунок 10 – Схема дугового генератора плазмы с плазменным фильтром

Электроды, расположенными под углом потоку плазмы, плазменного фильтра образуется оптически непрозрачная система, и производится отражение заряженного компонента плазменного потока от потенциального барьера, формируемого скрещенными магнитными и индукционными полями, рисунок 11.

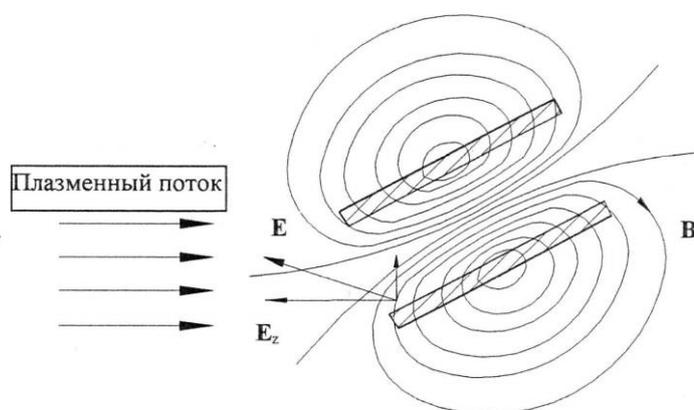


Рисунок 11 – Принцип действия ПФ

1.2.4 Генератор короткоимпульсного высокочастотного напряжения

Импульсное напряжение смещения формируется короткоимпульсным высокочастотным генератором напряжения смещения и подается на подложкодержатель. Частотный генератор позволяет получать электрические колебания в диапазоне частот от нескольких десятков кГц до сотен МГц.

Внешний вид генератора напряжения смещения представлен на рисунке 12 [5, 17].



Рисунок 12 – Внешний вид генератора напряжения смещения

1.2.5 Вакуумная система и система откачки

В установках зачастую используется технологический вакуумный пост и насосы. Они предназначены для безмасляной откачки воздуха, газов и газовых смесей из вакуумных систем, для создания глубокого и сверхглубокого вакуума.

В состав поста, который изображен на рисунке 13, входят: рабочая камера с планетарным механизмом перемещения образцов, механический форвакуумный насос, диффузионный паромасляный насос, вакуумметр, система напуска газа, блок управления насосами и запорной арматурой, система охлаждения.

Вакуумный пост имеет следующие параметры:

- объем вакуумной камеры: 0,6 м³;
- остаточное давление: 6,5 10⁻³ Па;
- число позиций для подложек: 16 шт;
- предел регулирования расхода газа: 1-500 мл/мин [5].

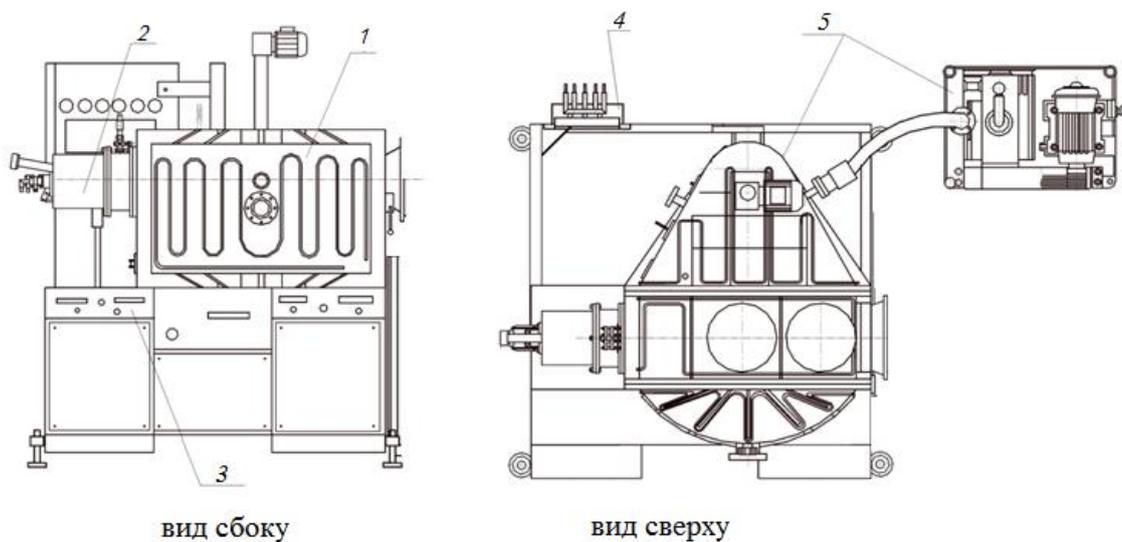


Рисунок 13 – Вакуумный пост, где 1 – вакуумная камера, 2 – электродуговой испаритель, 3 – пост, 4 – система охлаждения, 5 – насосы

2 Методики исследования и оборудование

2.1 Комплексная установка для реализации гибридных технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов

Оборудование, на котором были осуществлены экспериментальные исследования, с применением метода высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий представляет собой комплексную установку (КУ), схема которой представлена на рисунке 14, а технические характеристики в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Состав и технические характеристики КУ

ЭДИ с ПФ		Источник ионов "Радуга-5"	
Ток разряда, А	40–300	Ток пучка ионов, А	до 2
Степень снижения МКФ (Ti)	10^2 – 10^4	Ускоряющее напряжение, кВ	до 40
Эффективность прохождения плазменного потока (Ti), %	до 50	Длительность/ частота импульса ускоряющего напряжения, мкс/с ⁻¹	400/ до 200
Скорость нанесения покрытий, мкм/ч	до 20		
Количество, шт.	4–8	Высокочастотный, короткоимпульсный генератор напряжения смещения	
Генератор газовой плазмы ПИНК¹		Амплитуда импульсов, кВ	0–4
Концентрация плазмы, см ⁻³	10^{10}	Частота следования и длительность импульсов, с ⁻¹ / мкс	до 10^5 / 1–9
Ток разряда, А	5–200		
Плотность тока ионов из плазмы, мА/см ²	1–10	Ток в источнике, А	до 20
Количество, шт.	1–3	Коэффициент заполнения импульсов	до 0,9
Среднечастотный дуальный магнетрон			
Размеры мишеней, м	0,8/1/0,1	Вакуумный пост	
Напряжение разряда, кВ	0,35–1	Объем вакуумной камеры, м ³	0,6
Ток разряда, А	1–30	Остаточное давление, Па	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Частота генерации разряда, с ⁻¹	$4 \cdot 10^4$	Число позиций в планетарном механизме, шт.	16

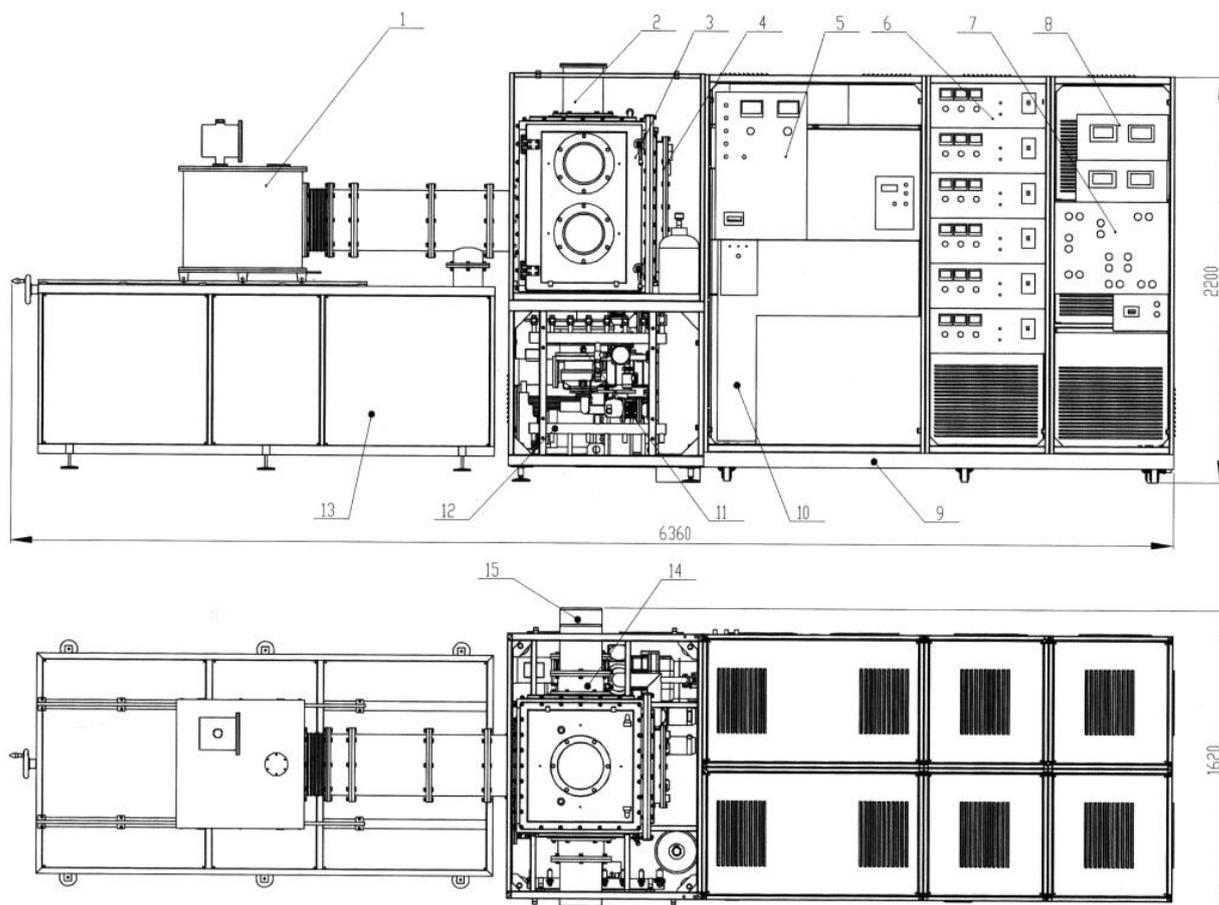


Рисунок 14 – Схема комплексной установки: 1 – источник ионов и плазмы «Радуга-5»; 2 – генератор газовой плазмы «ПИНК»; 3 – вакуумная камера; 4 – среднечастотная дуальная МРС; 5 – система питания и управления МРС; 6 – система питания и управления ЭДИ; 7, 8 – система управления КУ; 9 – стойка КУ; 10 – короткоимпульсный высокочастотный генератор напряжения смещения; 11 – система вакуумирования; 12 – система нагрева и охлаждения стенок вакуумной камеры; 13 – система питания и управления источника «Радуга-5»; 14 – ПФ; 15 – ЭДИ

Внешний вид комплексной установки представлен на рисунке 15.

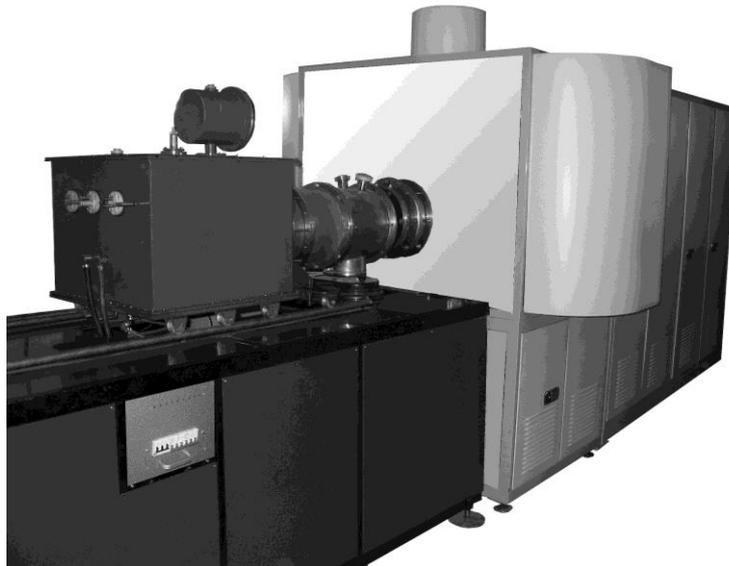


Рисунок 15 – Внешний вид комплексной установки

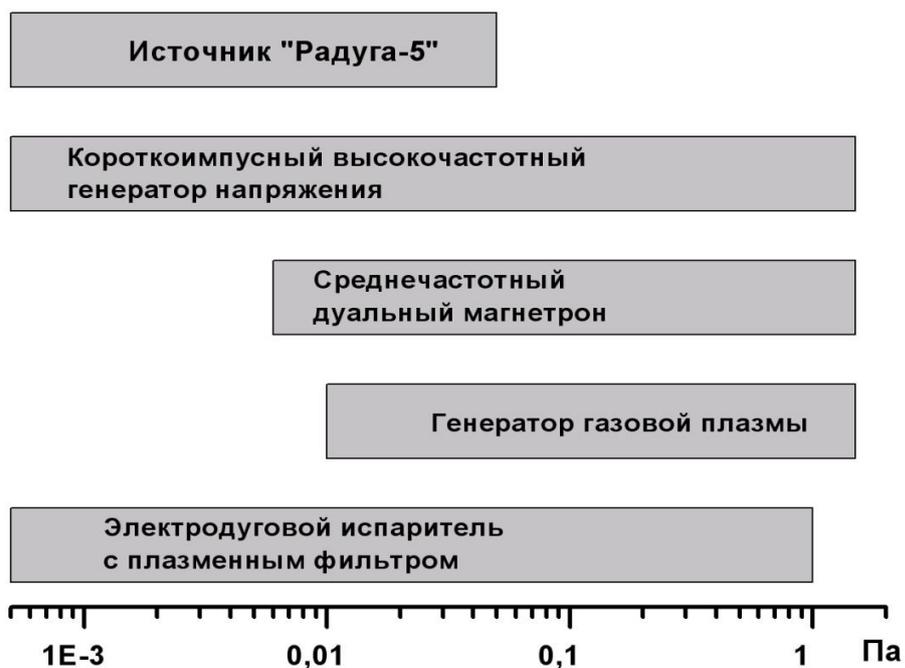


Рисунок 16 – Область рабочего давления оборудования комплексной установки

2.2 Оборудование и методики экспериментальных исследований параметров плазмы и ионных пучков

Для изучения параметров плазмы используются методы зондовой диагностики. Одним из простых, высокоточных и надежных датчиков измерения является двойной зонд Ленгмюра. В его основе лежит метод измерения

плотности тока заряженных частиц в зависимости от потенциала на электрическом проводнике, погруженном в плазму. (какие параметры)

Проводящая часть зонда выполнена из металла, а изолирующая часть зонда обычно изготавливается из стекла или кварца. Конструктивным преимуществом зонда является его изолированность и отсутствие связи с каким-либо электродом системы. Также преимуществом является возможность проведения измерений при колебаниях потенциала плазмы.

Измерительная система состоит из измерительного зонда и опорного электрода (противозонда) и источника питания.

В качестве дублирующего метода исследований свойств плазмы и ионных пучков используется калориметрия. Калориметр состоит из термочувствительных элементов, обладающих линейной зависимостью выходного напряжения от температуры. Благодаря ему рассчитывают среднюю мощность ионного пучка [18].

2.3 Оборудование и методы исследования элементного состава и физико-механических свойств поверхностных слоев материалов

После воздействия пучками заряженных частиц или плазмой, необходимо определить физико-механические характеристики полученного покрытия, поскольку эти характеристики тесно связаны с выбранными режимами обработки, и они сильно влияют на эксплуатационные свойства полученных материалов.

В основном, при осуществлении исследований свойств поверхностных слоев, изучают элементный состав полученного покрытия, твердость полученного покрытия, напряженное состояние между поверхностью подложки и покрытием, адгезию, морфологию покрытия и т.д.

Процессы, которые обуславливают изменение характеристик материалов являются: распыление атомов, вторичная и электронная эмиссия, рассеяние и торможение ионов, диффузия, формирование дефектов, конденсация вещества.

Для осуществления исследования элементного состава материалов и покрытий используются Оже-электронная и атомно-эмиссионная спектрометрия. Также она может быть

В основе Оже-электронной спектрометрии происходит процесс ионизации внутренних уровней атома посредством бомбардировки электронами, с последующим испусканием электронов Оже, которые в дальнейшем регистрируются электронным спектрометром. Электроны Оже покидают атом с характерной для каждого атома энергией. Установка по осуществлению спектрометрии представлена на рисунке 17 [5].



Рисунок 17 – Установка для спектрометрии «Шхуна-2»

Для исследования морфологии покрытий применяется профилометрия. Данный вид исследования относится к бесконтактным методам и основан он на интерференционной микроскопии, которая осуществляется посредством оптических датчиков. Для измерений используется методика вычитания двух разных отражений от границ прозрачной среды. Результат исследования трехмерное, либо двухмерное изображение поверхности. Прибор изображен на рисунке 18.



Рисунок 18 – 3D профилометр «Micro measure 3D station»

Для определения толщины покрытия применяют методику сферического шлифа. Метод основан на том, что шар известного диаметра вращается прижатым к поверхности образца с определенной нагрузкой. При добавлении абразивной пасты к контактному участку на поверхности образуется сферический шлиф, который в дальнейшем анализируется специальным программным обеспечением. Также данная методика позволяет определить коэффициент трения скольжения и скорость износа образца. Прибор изображен на рисунке 19.



Рисунок 19 – Трибологическая установка ТНТ-S-AX-0000

Также немаловажным параметром материалов является адгезия. Она определяется за счет нанесения царапины алмазным индентором. Прибор определяет числовые параметры пленки и основы, такие как: коэффициент

трения, глубина проникновения. Программное обеспечение позволяет получить изображение и обработать данные и вывести их в виде графиков и таблиц. Прибор для проведения адгезионных свойств представлен на рисунке 20 [5].



Рисунок 20 – Прибор проведения адгезионных свойств MST-S-AX-0000

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

С каждым годом растет спрос на модифицированные материалы, обладающие высокой прочностью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, проводимостью и многими другими свойствами. Также процессы ионной имплантации позволяют получать тонкие покрытия, толщиной в несколько нанометров, которые с успехом используются в производстве интегральных схем в микроэлектронике и многих других областях. Подбор оптимальных методов производства материалов основывается на энергетической эффективности применяемых методов. В данной работе рассматривается метод короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения покрытий. Данный метод предназначен для оптимизации процессов получения модифицированных материалов.

Для эффективного использования научного потенциала научно-исследовательской работы (НИР) необходимо прилагать усилия не только к непосредственно её разработке, но и к проведению её анализа с точки зрения экономических требований, то есть определить затраты на разработку, продолжительность работ, рассмотреть вопрос об экономической эффективности НИР.

В организационно-экономической части выпускной квалификационной работы рассмотрены следующие вопросы:

1. Оценку коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения
2. Планирование научно-исследовательских работ
3. Расчет бюджета: материальных затрат, дополнительных выплат и заработной платы [21].

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями плазменных технологий являются предприятия, занимающиеся: производством строительных материалов, изготовлением декоративных покрытий, получением материалов с модифицированными поверхностями, очисткой поверхностей перед покраской, изготовлением специальных инструментов для резки, сверления и т.д., изготовлением интегральных микросхем, а также в машиностроении, и медицине. Карта сегментирования рынка представлена на рисунке 41 [21].

		Короткоимпульсная плазменно-иммерсионная ионная обработка материалов и осаждение покрытий				
		Производство износостойких инструментов	Производство декоративных покрытий	Медицина	Микроэлектроника	Производство модифицированных строительных материалов
Потребность	Сильная					
	Слабая					

Рисунок 41 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию результатов исследований

5.1.2 SWOT-анализ

Проведем SWOT-анализ метода плазменно-иммерсионной ионной имплантации. Результаты первого этапа, а именно описание сильных и слабых сторон проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта,

которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Экономичность и энергоэффективность технологии.	Сл1. Сложность установки, на которой реализуется данный метод
С2. Экологически чистые технологии, минимальные выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду.	Сл2. Отсутствие унифицированного прототипа установки
С3. Оптимизирован технологический процесс модификации материалов.	Сл3. Наличие микрокапельной фракции на материалах
С4. Широкий спектр изменяемых физических свойств материалов.	Сл4. Большое потребление электроэнергии
С5. Широкая область применения данной технологии.	
С6. Относительная дешевизна установки.	
Возможности	Угрозы
В1. Организация массового производства установок.	У1. Разработка более эффективной, универсальной технологии модификации материала.
В2. Целенаправленное сотрудничество с предприятиями, заинтересованными в данной технологии. Как следствие, изготовление установок на заданную мощность и производительность.	У2. Отсутствие промышленной базы для серийного производства установки и, следовательно, малое внедрение на мировой и российский рынок.
В3. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	У3. Отсутствие финансирования проекта

Проведем второй этап SWOT-анализа. Результаты приведены в таблице 10. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу научной разработки.

Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей SWOT-матрицы. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 10 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта							
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	+	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+	+	+
	B3	+	+	+	+	+	+
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	-	-	-	-	+	+
	У2	+	+	+	+	+	+
	У3	+	+	+	+	0	+
Слабые стороны проекта							
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	B1	0	0	-	+		
	B2	0	0	-	+		
	B3	-	-	-	+		
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	У1	+	+	0	-		
	У2	-	-	0	0		
	У3	-	0	0	-		

Третий этап заключается в составлении итоговой матрицы SWOT – анализа, заполняемой на основании анализа таблиц 9 и 10. Результаты анализа запишем в итоговую таблицу 11. По результатам SWOT-анализа делаем вывод о том, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над её недостатками. Сильные стороны проекта могут понизить процент угроз исследования [21].

Таблица 11 – результаты SWOT анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологически чистые технологии, минимальные выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду. С3. Оптимизирован технологический процесс модификации материалов. С4. Широкий спектр изменяемых физических свойств материалов. С5. Широкая область применения данной технологии С6. Относительная дешевизна</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Сложность установки, на которой реализуется данный метод. Сл2. Отсутствие технологии массового производства установок и, следовательно, малое внедрение на мировой и российский рынок. Сл3. Наличие микрокапельной фракции. Сл4. Большое потребление электроэнергии.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Организация массового производства установок. В2. Целенаправленное сотрудничество с предприятиями, заинтересованными в данной технологии. Как следствие, изготовление установок на заданную мощность и производительность. В3. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>Метод короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной обработки материалов позволяет оптимизировать имеющиеся технологии в плане энергоэффективности. Желаемое направление развития – это внедрение массового производства и сотрудничество с предприятиями, что приведет к укреплению данного метода модификации материалов, как на российском рынке, так и за рубежом.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>Слабые стороны рассмотренного метода не являются сильной преградой для внедрения данного метода в промышленном масштабе, поскольку ведутся активные работы по решению слабых сторон.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Разработка более эффективного, универсального метода модификации материалов.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>Разработка новых методик не искоренит применение данной методики, а лишь расширит ее существующие возможности за счет их гибридизации.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>Опасным фактором для постановки технологии на производственный масштаб является отсутствие должное финансирование и заинтересованность в данной технологии.</p>

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер.

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

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок составления этапов и работ приведен в таблице 12 [21].

Таблица 12 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ		Должность исполнителя
Разработка технического задания на ВКР	1	Составление и утверждение технического задания		Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Изучение проблемы и подбор литературы		Инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме метода ионно-лучевой и ионно-плазменной модификации материалов		Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме		Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Моделирование технологического процесса на компьютере	Расчет энергетических показателей в зависимости от полученных свойств материала. Выбор оптимальных режимов метода	руководитель, инженер
			Расчет процесса короткоимпульсной плазменно-иммерсионной имплантации и осаждения покрытий Определение оптимальных режимов процесса обработки	
			Оценка энергозатрат на процесс обработки материалов	
	8		Определение оптимальных режимов метода короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной обработки и осаждения покрытий	руководитель, инженер
1	9		Планирование экспериментов и экспериментальные исследования метода	

5.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Составление и утверждение технического задания	14.01.2016	Приказ № 791/с об утверждении руководителей и тем выпускных квалификационных работ студентов ФТИ
2	Изучение проблемы и подбор литературы	14.01.2016- 18.03.2016	Список литературы
3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	18.03.2016	Отчёт
4	Календарное планирование работ	19.03.2016	План работ
5	Моделирование технологического процесса на компьютере	11.04.2016- 15.04.2016	Отчёт
6	Планирование и проведение экспериментальных исследований	15.04.2016- 21.04.2016	Отчёт
7	Анализ и обработка полученных результатов	21.04.2016- 1.05.2016	Отчёт
8	Оценка эффективности полученных результатов	1.05.2016- 10.05.2016	Отчёт
9	Составление пояснительной записки	10.06.2016- 12.06.2016	Пояснительная записка
10	Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу	12.05.2016	
11	Подготовка к защите	12.05.2016- 21.06.2016	

5.2.3 План проекта

Таблица 14 – Календарный план-график проведения научного исследования

№	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	▨											
2	Изучение проблемы и подбор литературы	Руководитель, студент	5	▨	■										
3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	Студент	18			■	■	■							
4	Календарное планирование работ	Руководитель, студент	1				▨	■							
5	Моделирование технологического процесса на компьютере	Студент	18					■	■	■					
6	Планирование и проведение экспериментальных исследований	Руководитель, студент	18							▨	■	■			
9	Составление пояснительной записки	Студент	18											■	
10	Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу	Руководитель, студент	1											▨	■
11	Подготовка к защите	Студент	3												■

▨ – Руководитель ■ – Студент

5.3 Бюджет научно-технического исследования

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

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы [21].

5.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам,

износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;

- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований).

Некоторые материалы: ВЧ-генератор, масла и реагенты являются собственностью кафедры Технической физики, поэтому в расчет показателей затрат не берутся.

Эксперименты проводились 9 дней по 2 часа (18 часов), мощность установки 100 кВт/час и расход охлаждающей воды (не менее) 1,8 м³/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле 20.

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} , \quad (20)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,7 руб за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

$$C_{эл} = 2,7 \cdot 100 \cdot 18 = 4860 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение рассчитываются по формуле 21.

$$C_{вд} = C_{вд} \cdot Q \cdot F_{об} , \quad (21)$$

где $C_{вд}$ – тариф на промышленное водоснабжение (8 руб за 1 м³);

Q – расход воды, м³;

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

$$C_{вд} = 8 \cdot 1,8 \cdot 18 = 259,2 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле 22.

$$C_m = C_{эл} + C_{вд} , \quad (22)$$

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле 23

$$Z_m = (1 + K_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \int N_{расхи} , \quad (23)$$

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

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, m^2 и т.д.);

$Ц_i$ – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./ m^2 и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Расчет затрат представлен в таблице 15 [21].

Таблица 15 – Материальные затраты НИР

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Электроэнергия	кВт/ч	1800	2,7	4860
Водоснабжение	m^3	32,4	8	259,2
Итого:			10,7	5119,2

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

Данная статья включает все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ. Поскольку, в работе использовалось только уже имеющееся оборудование, его стоимость следует учитывать в калькуляции в виде амортизационных отчислений [21].

5.3.2.1 Заработная плата исполнителей темы

Данная статья включает в себя затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в выполнении НИР, включая (премии, доплаты, и дополнительную заработную плату). Средняя рассчитывается по формуле 24.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (24)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основную заработную плату руководителя НИР можно рассчитать по формуле 25.

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_{раб}, \quad (25)$$

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

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

Значит, для руководителя: $Z_{осн} = 1725,64 \times 25 = 44116$ рублей

для инженера: $Z_{осн} = 930,19 \times 111 = 103251,09$ рублей

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 26.

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_d, \quad (26)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 16 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер-исследователь
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	24
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле 13.

$$Z_m = Z_{тс} \cdot K_p, \quad (13)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб. (для доцента ЗТС составляет 22300 руб., для инженера исследователя 10223 руб.);

K_p – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 17 [21].

Таблица 17 – Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	K_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T раб раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	22300	1,3	28990	1201	10	12010
Инженер	10223		13290,316	477	96	42912
Итого $Z_{осн}$:						54922

5.3.2.2 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается

исходя из 10-15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы, формула 27.

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} * K_{\text{доп}}, \quad (27)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$K_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($K_{\text{доп}}=0,1$);

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 18 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 18 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб	12010	42912
Дополнительная зарплата, руб	1201	4291
Зарплата исполнителя, руб	13211	47203
Итого по статье $C_{\text{зп}}$, руб	60414	

5.3.2.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы 28.

$$Z_{\text{неб}} = k_{\text{неб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (28)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 № 212 -ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30 %. На основании пункта 1 ст.58

закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1 % .

Отчисления во внебюджетные фонды представим в табличной форме
таблица 19.

Таблица 19 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	Сумма отчислений
Руководитель проекта	12010	1201	0,271	3580,2
Студент-инженер	42912	4291		12792
			Итого:	16372,2

5.3.2.4 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле 29.

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (29)$$

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

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Примем $k_{\text{накл}} = 30 \%$.

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot 60414 = 18124,2 \text{ руб.}$$

5.3.2.5 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями.

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками.

Так как при проведении научно-технических исследований все подготовительно-отладочные работы, технологические операции и расчеты были осуществлены на базе Центра исследований свойств материалов при ТПУ с имеющимся оборудованием и расходными материалами только научным руководителем и дипломником без привлечения сторонних организаций, то в данном случае можно говорить, что контрагентные расходы отсутствуют [21].

5.3.2.6 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 20 [21].

Таблица 20 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	5119,2
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	0
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	54922
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5492
5. Отчисления во внебюджетные фонды	16372,2
6. Накладные расходы	18124,2
7. Контрагентные расходы	0
Бюджет затрат НТИ:	100029,6

5.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель).

Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 42 [21].



Рисунок 42 – Организационная структура научного проекта

5.4.1 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 21.

Таблица 21 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Составление и утверждение технического задания	О				
Изучение проблемы и подбор литературы					И

Продолжение таблицы 21 – Матрица ответственности

Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	С				И
Календарное планирование работ по теме	О				И
Моделирование технологического процесса на компьютере					И
Планирование и проведение экспериментальных исследований	С				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Анализ и обработка полученных результатов					И
Оценка эффективности полученных результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках

этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);

– согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям [21].

5.4.2 Определение интегрального показателя эффективности

Эффективность планируемого исследования можно оценить на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Данный показатель определяется из двух средневзвешенных величин:

- финансовой эффективности;
- ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле 30.

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} \quad (30)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля). Представим расчет в виде таблицы 22.

Таблица 22 – Интегральный финансовый показатель

	Плазменная обработка	Традиционный метод переработки
I_{ϕ}^p	0,13	1

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом, формулы 31 и 31.

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad (31)$$

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p, \quad (32)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта параметра;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта представлена в таблице 23.

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Плазменная модификация	Традиционная модификация	Интегральный показатель ресурсоэффективности	
				Плазменная модификация	Традиционная модификация
1. Производительность	0,19	4	2	0,76/	0,38
2. Отсутствие подготовительных работ	0,09	5	1	0,45	0,09
3. Отсутствие загрязнений окружающей среды	0,11	3	1	0,33	0,11
4. Энергосбережение	0,19	5	2	0,95	0,38

Продолжение таблицы 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

5. Простота монтажа установки	0,08	5	1	0,4	0,08
6. Уровень проникновения на рынок	0,07	5	3	0,35	0,21
7. Стоимость установки (включая монтаж)	0,06	5	3	0,3	0,18
8. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	4	5	0,28	0,35
9. Срок выхода на рынок	0,09	5	2	0,45	0,18
10. Наличие сертификации разработки	0,05	2	5	0,1	0,25
Итого:	1	-	-	4,37	2,21

$$I_m^{\text{плазм}} = 4,37, I_m^{\text{традиц}} = 2,21.$$

Полученные результаты, позволяют сделать вывод о том, что научно-техническое исследование обладает наибольшей ресурсоэффективностью при плазменном способе обработки материалов, т.е. при средней производительности, и повышенном энергосбережении.

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам 33 и 34.

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p}, \quad (33)$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a}. \quad (34)$$

Таблица 24 – Интегральный показатель эффективности разработки и ее аналогов

	Плазменная модификация	Традиционный модификации
$I_{\text{финр}}^p$	31,3	2,9

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле 35.

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}, \quad (35)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта; $I_{\text{финр}}^p$ - интегральный показатель разработки; $I_{\text{финр}}^a$ - интегральный показатель аналога;

Таблица 25 – Сводная таблица параметров

№	Показатель	Плазменная модификация	Традиционный метод модификации
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,13	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,07	2,9
3	Интегральный показатель эффективности	31,3	2,9
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	10,8	1

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет делать вывод о том, что разрабатываемый вариант технологии является наиболее эффективным [21].

Список публикаций студента

1. Н. С. Аверин, С. Г. Желомский, А. В. Годовых // III Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири : сборник тезисов докладов, г. Томск, 28-30 ноября 2012 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; Росатом. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – [С. 49-50]. - Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2012/C63/012.pdf>.