

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

---

Институт физико-технический  
Направление подготовки техническая физика  
Кафедра экспериментальной физики

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Исследование тепловых и эрозионных процессов в теплоизолированных мишенях магнетронных распылительных систем</b>

УДК 621.647.23.001.24.536.24.4: 620.19: 621.384.664.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОД21	Комарова Диана Андреевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЭФ ФТИ	Блейхер Галина Алексеевна	д.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента ИСГТ	Сечина Ася Александровна	к.х.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭФ ФТИ	Кривобоков Валерий Павлович	д.ф.-м.н., профессор		

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

---

Физико-технический институт  
Направление подготовки: Техническая физика  
Кафедра экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_Кривобоков В.П.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

дипломной работы бакалавра
----------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0Д21	Комаровой Диане Андреевне

Тема работы:

Исследование тепловых и эрозионных процессов в теплоизолированных мишенях магнетронных распылительных систем	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	3223/С от 27.04.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	16.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	1) параметры жидкофазной МРС и МРС в импульсно-периодическом режиме (материалы тиглей, материалы мишеней, частота следования импульсов, время импульса, коэффициент заполнения); 2) математическая модель тепловых и эрозионных процессов в мишени при работе МРС; 3) геометрические параметры тигля и мишени, 4) компьютерные программы, реализующие математическую модель тепловых и эрозионных процессов.
---------------------------------	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) назначение и принципы работы МРС;</li> <li>2) обзор различных видов современных МРС, их достоинства и недостатки;</li> <li>3) способы повышения скорости осаждения покрытий с использованием МРС;</li> <li>4) механизмы эрозии при высокоскоростном осаждении покрытий;</li> <li>5) нестационарная математическая модель тепловых и эрозионных процессов в системе «мишень в теплоизолированном тигле» для МРС на постоянном токе;</li> <li>6) математическая модель нестационарных тепловых и эмиссионных процессов в мишени с разными способами теплоотвода при работе сильноточечных импульсных МРС;</li> <li>7) обоснование корректности моделей;</li> <li>8) описание компьютерных программ, реализующих математические модели эрозии поверхности мишеней при работе МРС разных видов;</li> <li>9) закономерности тепловых процессов и эрозии поверхности мишени под действием плазмы МРС разного вида.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) актуальность поставленной задачи;</li> <li>2) способы организации теплопроводной изоляции мишени;</li> <li>3) механизмы эрозии при возникновении фазовых превращений;</li> <li>4) нестационарная модель тепловых процессов;</li> <li>5) представление пространственных областей для нестационарной модели тепловых процессов;</li> <li>6) использованные компьютерные программы;</li> <li>7) виды усреднения мощности импульсных МРС;</li> <li>8) эволюция температуры в мишени МРС;</li> <li>9) зависимость скорости эрозии от параметров МРС;</li> </ol>

	10) сопоставление возможностей МРС с разными видами мишеней; 11) скорость эрозии в зависимости от плотности мощности МРС; 12) фактор неравномерности плотности мощности вдоль поверхности мишени; 13) выводы.
--	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сечина Ася Александровна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Описание компьютерных программ, реализующих математические модели эрозии поверхности мишеней при работе МРС разных видов

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	11.09.2015
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЭФ ФТИ	Блейхер Галина Алексеевна	д.ф.-м.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Д21	Комарова Диана Андреевна		

**Результаты обучения бакалавров  
направления 16.03.01 «Техническая физика»  
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Использовать фундаментальные законы природы и естественнонаучных дисциплин, физико-математический аппарат, методы математического анализа, моделирования, оптимизации и статистики для решения задач в различных отраслях технической физики.	Требования ФГОС (ПК-2, 3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Участвовать в теоретических и экспериментальных исследованиях в различных отраслях технической физики, связанных с современными высокотехнологическими способами обработки материалов, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков; самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий, изучать научно-техническую информацию, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых объектов.	Требования ФГОС (ПК-4, 10, 11, 12, 13). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Владеть основными методами работы с информацией, самостоятельно работать на компьютере в средах современных операционных систем и наиболее распространенных прикладных программ и программ компьютерной графики, применять современные образовательные и информационные технологии.	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р4	Знать иностранный язык на уровне, позволяющем работать с научно-технической литературой и участвовать в международном сотрудничестве в области технической физики.	Требования ФГОС (ПК-8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	Участвовать в производственно-технологической деятельности, определять основные параметры	Требования ФГОС (ПК-14, 15, 17). Критерий 5 АИОР, согласованный с

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	технологических процессов, анализировать свойства физико-технических объектов, изделий и материалов, применять современные информационные технологии, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов и изделий.	требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р6	Использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации изделий, элементы экономического анализа производственно-технологических циклов, знать и выполнять правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда.	Требования ФГОС (ПК-16, 18). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р7	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, разрабатывать функциональные и структурные схемы элементов и узлов экспериментальных и промышленных электрофизических установок, реализующих современные пучковые и плазменные технологии, проектировать технологические процессы и оборудование с использованием современных информационных технологий.	Требования ФГОС (ПК-19, 20). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р8	Участвовать в организационно-управленческой деятельности, уметь работать в команде и организовывать работу исполнителей, находить и принимать управленческие решения.	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-21, 22, 23). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р9	Внедрять и коммерциализировать результаты исследований и проектно-конструкторских разработок, уметь оценивать инновационный потенциал новой продукции в области современных технологий, основанных на использовании радиационных и плазменных потоков.	Требования ФГОС (ПК-21, 22, 23, 24). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
Р10	Осознавать социальную значимость своей профессии, развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6, ПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение, повышать свою квалификацию и мастерство, поддерживать здоровый образ жизни	международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового и профессионального общения, владеть навыками публичной дискуссии, создавать и редактировать тексты профессионального назначения.	Требования ФГОС (ОК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Уметь критически переосмысливать свой накопленный социальный и профессиональный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, следовать этическим и правовым нормам и нести ответственность за последствия своей профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, 7, ПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

## Реферат

Работа включает в себя 132 страницы, 26 таблиц, 55 рисунков, 6 глав, 1 приложение, 23 литературных источника.

**Ключевые слова:** магнетронная распылительная система, жидкофазная магнетронная распылительная система, среднечастотная импульсная магнетронная распылительная система, сильноточная импульсная магнетронная распылительная система, тепловые и эрозионные процессы, «горячая» мишень.

Данная работа посвящена выявлению закономерностей тепловых и эрозионных процессов в теплоизолированных мишенях магнетронных распылительных систем при работе на постоянном токе и в импульсно-периодическом режиме.

**Цель работы:** получение закономерностей эволюции тепловых и эрозионных процессов в теплоизолированных и частично теплоизолированных мишенях в зависимости от параметров магнетронных распылительных систем, способных создавать высокоскоростную эмиссию.

В работе были использованы математические модели эмиссионных и тепловых процессов в мишени при воздействии плазмы магнетронных распылительных систем разного вида, а также комплекс компьютерных программ, реализующих данные математические модели, разработанный на кафедре ЭФ ФТИ НИ ТПУ.

В результате выполнения работы выявлены закономерности тепловых и эрозионных процессов в теплоизолированных мишенях магнетронных распылительных систем от рабочих параметров МРС (геометрические размеры, плотность мощности ионного тока на мишень, материалы мишеней и тиглей). Результаты получены как для магнетронов на постоянном токе, так и работающих в импульсно-периодическом режиме. Полученные результаты способствуют развитию представлений о тепловых и эрозионных процессах в мишенях МРС и способах повышения производительности осаждения покрытий с их использованием.

## Оглавление

Введение.....	11
Глава 1. Механизмы эмиссии атомов с поверхности мишени при работе магнетронных распылительных систем.....	14
1.1 Назначение и принцип работы магнетронных распылительных систем...14	
1.2 Обзор различных видов современных МРС, их достоинства и недостатки.....	17
1.3 Способы повышения скорости осаждения покрытий с использованием МРС.....	24
1.4 Постановка задачи исследований.....	28
Глава 2. Описание математических моделей эмиссионных и тепловых процессов в мишени при воздействии плазмы магнетронных распылительных систем разного вида.....	30
2.1 Механизмы эрозии при высокоскоростном осаждении покрытий.....	30
2.2 Математическая модель тепловых и эрозионных процессов при работе МРС на постоянном токе с теплоизолированной мишенью.....	32
2.3 Нестационарная математическая модель для МРС с жидкофазной мишенью.....	33
2.4 Математическая модель нестационарных тепловых и эмиссионных процессов в мишени с разными способами теплоотвода.....	34
2.5 Обоснование корректности моделей.....	37
Глава 3. Описание компьютерных программ, реализующих математические модели эрозии поверхности мишеней при работе МРС разных видов.....	40
3.1 Программа для расчета нестационарных тепловых и эрозионных процессов в системе «мишень в тигле» при работе МРС на постоянном токе.....	40
3.1.1 Назначение и функциональные возможности программы.....	40
3.1.2 Входные файлы.....	41
3.1.3 Работа с программой.....	42
3.1.4 Выходные файлы.....	45
3.2 Программа «Hot target MSS».....	45
3.2.1 Назначение и функциональные возможности программы.....	45
3.2.2 Входные файлы.....	46
3.2.3 Работа с программой.....	48
3.2.4 Выходные файлы.....	51
Глава 4. Закономерности тепловых процессов и эмиссии атомов на поверхности мишени под действием плазмы магнетронных распылительных систем разного вида.....	53

4.1 МРС с жидкофазной мишенью на постоянном токе.....	53
4.2 ИМРС с одиночным импульсом.....	61
4.3 Параметры ИМРС в импульсно-периодическом режиме.....	64
4.4 Эрозия частично теплоизолированной горячей твердотельной мишени...	65
4.5 Сравнение разных режимов и анализ влияния различных факторов на эмиссию.....	76
Глава 5. Социальная ответственность.....	81
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	81
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их при работе на ПЭВМ.....	83
5.3 Электробезопасность.....	88
5.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	89
Глава 6. Экономическая часть.....	93
6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения.....	93
6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	93
6.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	94
6.1.3 Технология QuaD.....	96
6.1.4 SWOT-анализ.....	98
6.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	100
6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	100
6.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	101
6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	107
6.3 Бюджет научно-исследовательского исследования.....	107
6.3.1 Расчет материальных затрат НИИ.....	107
6.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	107
6.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	109
6.3.4 Накладные расходы.....	110
6.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта...	111
6.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	112
Заключение.....	116
Список литературы.....	118
Приложение А.....	120

## **Введение**

В настоящее время в мире все большее распространение получают тонкопленочные покрытия. Данные покрытия применяются в различных отраслях деятельности, например, в машиностроении, микроэлектронике, медицине, оптике и др.

Одним из наиболее распространенных методов осаждения данных покрытий является метод магнетронного распыления. Суть данного метода заключается в том, что скрещенные электрические и магнитные поля, локализованные вблизи мишени магнетронной распылительной мишени, позволяют создавать интенсивную ионизацию в области перед катодом. Ионы, поступающие из плазмы в прикатодную зону и ускоряемые в ней до энергий порядка десятков – сотен эВ [1], попадают на поверхность мишени. Данной энергии оказывается достаточно для выбивания ионами из мишени атомов вещества, которые затем летят в противоположном направлении и осаждаются на модифицируемую поверхность (подложку). Ионы способны не только производить распыление мишени, но и нагревать ее. При этом температура мишени зависит от ряда обстоятельств, в том числе и от условий теплоотвода.

Метод магнетронного распыления имеет ряд преимуществ, таких, как хорошая адгезия покрытий к подложке, незначительное радиационное воздействие на подложку (в сравнении с методом диодного распыления), хорошая повторяемость процессов осаждения, возможность получения сложных по составу покрытий и др. [2]. Одним из главных недостатков метода магнетронного распыления является низкая скорость осаждения покрытий. На настоящий момент скорость осаждения покрытий в случае распыления металлических мишеней с использованием источника питания на постоянном токе не превышает 10 нм/с, а при получении покрытий сложного состава еще меньше [3]. При производстве тонкопленочных покрытий в промышленных масштабах данная скорость является неудовлетворительной.

Скорость роста покрытий зависит от интенсивности эмиссии атомов с поверхности мишени. Повышение интенсивности эмиссии атомов только за счет

распылительных механизмов не приводит к существенному увеличению скорости осаждения покрытий. Однако, ситуация существенно меняется, если к механизму распыления атомов мишени на поверхности магнетронных распылительных систем (МРС) «включить» механизм испарения атомов. Благодаря этому удастся существенно увеличить плотность потока эмиссии частиц с поверхности мишени МРС за счет испарения, что благоприятно сказывается на качестве осаждаемых покрытий [3] и примерно на один – два порядка поднять их скорость осаждения [4,5].

Однако, в настоящее время закономерности тепловых и эрозионных процессов в мишени МРС не изучены систематически. Поэтому целью данной работы является получение закономерностей эволюции тепловых и эрозионных процессов в теплоизолированных и частично теплоизолированных мишенях в зависимости от параметров магнетронных распылительных систем, способных создавать высокоскоростную эмиссию. При этом принимаются во внимание разные способы создания испарения (расплавленная мишень в тигле и «горячая» твердотельная мишень). Также принимаются во внимание разные режимы подачи мощности в цепь МРС (МРС на постоянном токе и МРС в импульсно-периодическом режиме).

Основные задачи данной работы состоят в следующем:

1. Изучить математические модели и освоить работу с компьютерными программами, описывающими тепловые и эрозионные процессы в жидкофазных и твердотельных мишенях планарных магнетронных распылительных систем.

Компьютерные программы:

- «LFMagnetron\_фикс сетка\_неравномерный ток» (для жидкофазной мишени в тигле);

- «Hot target» (для твердотельной «горячей» мишени).

2. Выполнить расчёты с использованием этих программ, построить и проанализировать закономерности разогрева и создания эрозионного потока на поверхности теплоизолированных и частично теплоизолированных металлических мишеней магнетронов.

Принять во внимание следующие факторы:

а) агрегатное состояние мишени:

- расплав в тигле,
- твёрдое тело с локальным расплавлением;

б) неравномерное распределение плотности мощности вдоль поверхности мишени;

в) непрерывный и импульсно-периодический режим подачи мощности (напряжения и тока) в электрическую цепь МРС.

3. Выявить закономерности влияния рабочих параметров магнетронов на усиление скорости эрозии поверхности металлических мишеней МРС за счёт создания испарения, исследовать возможности магнетронов, работающих с жидкофазными и горячими твердотельными мишенями, в увеличении производительности осаждения покрытий.

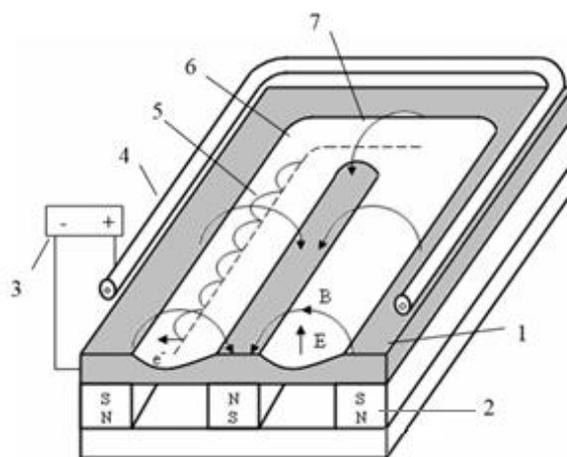
## **Глава 1. Механизмы эмиссии атомов с поверхности мишени при работе магнетронных распылительных систем**

### **1.1 Назначение и принципы работы магнетронных распылительных систем**

Магнетронные распылительные системы (МРС) – устройства, предназначенные для осаждения тонкопленочных покрытий в условиях вакуума. Принцип работы МРС заключается в генерации газоразрядной плазмы аномального тлеющего разряда при давлении порядка 0,1 Па между двумя электродами, один из которых (катод) является мишенью магнетрона, в скрещенном электрическом и магнитном полях. Данная плазма является источником ионов, ускоряемых в прикатодном пространстве и воздействующих непосредственно на мишень магнетрона. Энергия этих ионов составляет десятки – сотни электронвольт [1], что оказывается достаточным для выбивания ими из мишени атомов вещества, которые затем летят в противоположном направлении и осаждаются на модифицируемую поверхность (подложку).

С помощью данных систем возможно получать металлические и диэлектрические покрытия, которые могут быть одно- или многокомпонентными.

На рисунке 1 приведено схематическое изображение планарной МРС.



*Рисунок 1 – Схема MPC с плоским катодом: 1 – катод-мишень, 2 – блок с магнитной системой, 3 – источник питания, 4 – анод, 5 – траектория движения электронов, 6 – зона распыления, 7 – силовая линия магнитного поля [2].*

Типичная конструкция планарной MPC, представленной на рисунке 1, состоит из следующих основных частей: катода, магнитной системы, анода. Магниты охлаждаются проточной водой (на рисунке система охлаждения не показана). Напряжение, подаваемое на катод, составляет 300-800 В [2].

Магнитная система 2 состоит, как правило, из постоянных магнитов, закрепленных на магнитопроводе, изготовленном из магнитомягкого материала. Магнитная система создает над поверхностью катода магнитное поле 7.

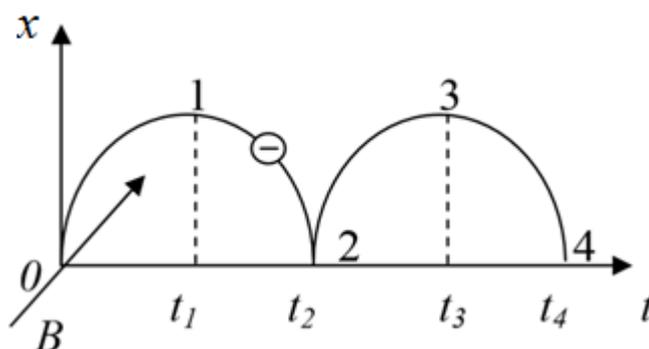
Анод 4 расположен над катодом и обеспечивает создание электрического поля, составляющая которого перпендикулярна плоскости катода.

Рассмотрим законы движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях при работе MPC.

Если силовые линии магнитного поля перпендикулярны силовым линиям электрического поля, то траектории электронов будут представлять собой циклоиды (рис.2). Пусть в некоторый начальный момент времени заряженная частица (электрон) находится в точке 0 и ее скорость равна нулю. Под действием электрического поля электрон начинает ускоряться вдоль оси E. По мере увеличения скорости, сила, действующая со стороны магнитного поля, будет

возрастать, так как она пропорциональна скорости, и движущийся электрон начнет отклоняться в сторону от оси  $E$  [2].

Постепенный поворот траектории приведет к тому, что электрон, начиная с некоторого момента времени  $t_1$ , которому соответствует точка 1, начнет двигаться к горизонтальной оси  $t$ . На участке траектории от точки 1 к точке 2 скорость электрона из-за торможения в электрическом поле уменьшается и обращается в нуль, когда он в момент времени  $t_2$  достигает горизонтальной оси – точка 2. Затем снова начинается процесс ускорения, сменяющийся фазой торможения и отклонением траектории от точки 3 до точки 4 и т.д.



*Рисунок 2 – Траектория движения электрона в перпендикулярных электрическом и магнитном полях.*

Таким образом, траектория электрона состоит из периодически повторяющихся одинаковых фаз и представляет собой циклоиду.

При движении по циклоиде электроны, эмитируемые катодом, не могут двигаться к аноду в перпендикулярном направлении, так как оказываются в своеобразной ловушке, создаваемой магнитным полем. Они будут перемещаться над поверхностью катода до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, и они не потеряют свою энергию. Большая часть энергии электронов расходуется на ионизацию в непосредственной близости от поверхности катода, где создается высокая концентрация положительных ионов.

Ионы, которые образовались в области газоразрядной плазмы, экстрагируются из неё за счёт действия электрического поля со стороны катода и ускоряются в прикатодной области. Энергия, которую они приобретают,

определяется напряжением ( $U$ ) в электрической цепи МРС. Так как обычно оно составляет величину в несколько сотен эВ, то энергии ионов оказывается достаточно для того, чтобы распылять поверхность мишени магнетрона [3].

За счет интенсивной ионизации у поверхности катода достигается высокая плотность ионного тока и большая удельная мощность, передаваемая мишени. Локализация электронов вблизи мишени предотвращает бомбардировку ими подложек, что снижает температуру и радиационные дефекты в создаваемых структурах. Однако главным достоинством магнетронных распылительных систем является возможность получения довольно равномерных по толщине пленок на больших по площади подложках.

Исследования показывают, что основная энергия, которую получает мишень со стороны плазмы, это – энергия ионного тока [6].

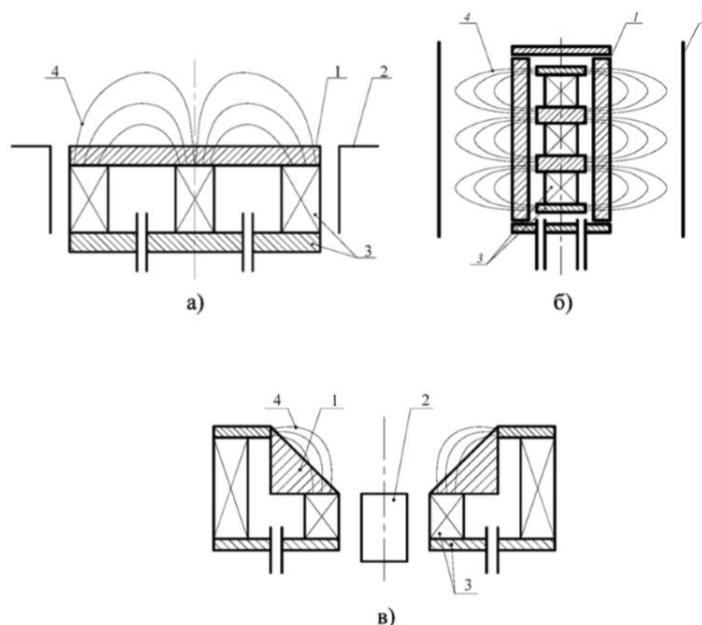
Кинетическая энергия ионов пропорциональна напряжению на разрядном промежутке, а плотность ионного тока определяется плотностью ионизации вблизи мишени, которая в свою очередь пропорциональна продольной составляющей вектора магнитной индукции [6].

## **1.2 Обзор различных видов современных МРС, их достоинства и недостатки**

Магнетронные распылительные системы можно разделить на несколько типов, в зависимости от вида мишени (планарные, цилиндрические, конические), степени ионного воздействия на подложку (сбалансированные и несбалансированные), магнитной системы (стационарной или перемещаемой), источника питания (постоянным, импульсным, переменным или высокочастотным током) и т.п. Рассмотрим различные виды МРС более подробно.

Основным элементом МРС является распыляемый катод-мишень. Можно выделить три наиболее применяемых типа МРС, различающихся по форме катода: плоские МРС с дисковым или протяженным катодом (планарные),

цилиндрические и конические. На рисунке 3 схематично приведены данные виды мишеней.



*Рисунок 3 – Основные конструктивные схемы MPC: а) планарная MPC, б) цилиндрическая MPC, в) MPC с конической мишенью. 1 – катод-мишень, 2 – анод, 3 – магнитная система, 4 – силовые линии магнитного поля [7]*

Самыми распространенными являются MPC с плоской мишенью. Магнетрон с дисковым катодом может использоваться в небольших установках для нанесения упрочняющих покрытий, проводящих дорожек в микросхемах, отражающих и интерференционных покрытий на небольшие оптические детали. Плоские MPC с протяженным катодом применяются в установках для нанесения покрытий на листовые материалы больших размеров (до 3200x6400 мм) или рулонные материалы. Например, архитектурное стекло, листовой металл, лавсановая пленка и т.п. В MPC с плоским катодом коэффициент использования материала имеет относительно низкие величины 20 - 30 %.

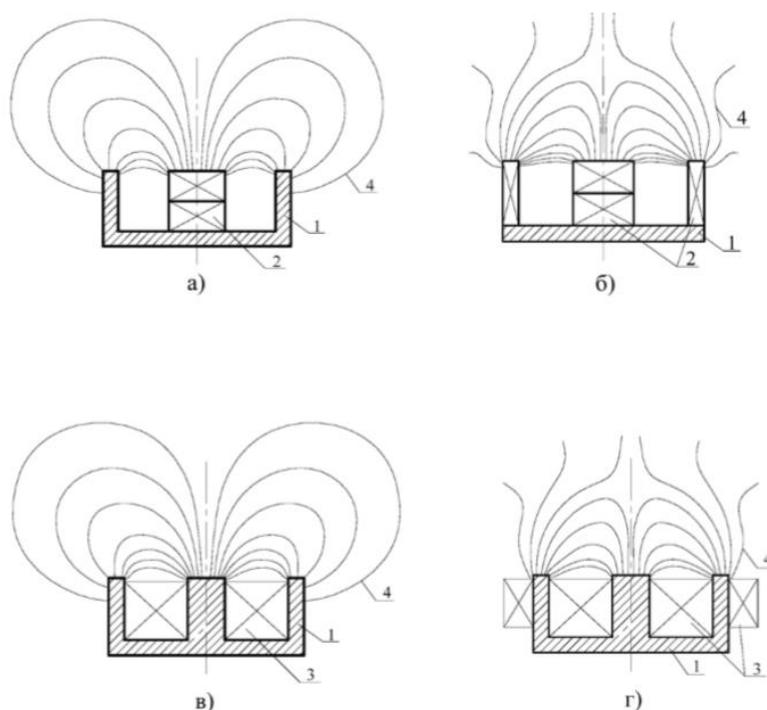
Цилиндрические MPC используются тогда, когда необходимо обеспечить максимальную загрузку камеры обрабатываемыми изделиями. При этом обеспечивается максимальная площадь обрабатываемой поверхности, высокая скорость напыления покрытия и хорошая равномерность по толщине [8]. Магнитная система в таких MPC состоит из нескольких цилиндрических

магнитов, разделенных вставками из ферромагнитного материала. Разряд горит в виде нескольких колец, расположенных внутри арок магнитного поля. В цилиндрических МРС коэффициент использования материала катода достигает величины 35-45%.

Комбинация МРС с плоским дисковым катодом и МРС с коническим катодом позволяет получить высокую равномерность толщины покрытия на дисковой подложке с диаметром равным наружному диаметру конического катода [9]. Такие устройства применяются для нанесения магнитных покрытий на диски накопителей информации.

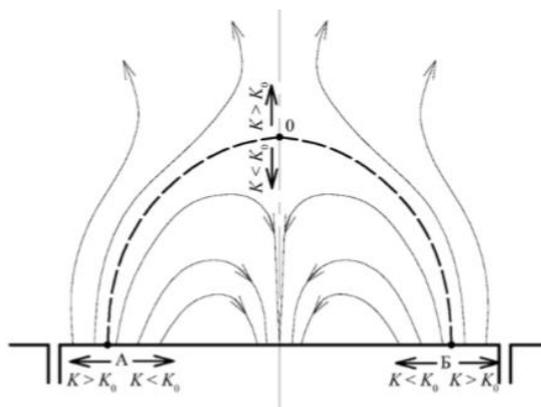
Выделяют два типа конфигурации магнитного поля над поверхностью катода или два типа магнитной системы, создающих такие конфигурации. Это сбалансированная магнитная система и несбалансированная магнитная система. В сбалансированной магнитной системе магнитный поток, проходящий через внутренний полюс магнитной системы ( $\Phi_{\text{внутр}}$ ), равен магнитному потоку, проходящему через внешний полюс  $\Phi_{\text{внешн}}$ . В несбалансированной магнитной системе магнитный поток, проходящий через внутренний полюс магнитной системы ( $\Phi_{\text{внутр}}$ ), меньше магнитного потока, проходящего через внешний полюс  $\Phi_{\text{внешн}}$ .

Магнитная система магнетронных распылительных систем может быть собрана как на постоянных магнитах, так и электромагнитах. Любая конфигурация магнитного поля, полученная на постоянных магнитах, может быть получена на электромагнитах. На рисунке 4 показаны магнитные системы МРС с плоским катодом, выполненные на постоянных магнитах и эквивалентные им по конфигурации магнитного поля магнитные системы, выполненные на электромагнитах.



*Рисунок 4 – Магнитные системы МРС с плоским катодом. Магнитные системы на постоянных магнитах (а), (б). Магнитные системы на электромагнитах (в), (г): 1 – магнитопровод, 2 – постоянный магнит, 3 – электромагнитная катушка, 4 – магнитные силовые линии [7]*

Для несбалансированной магнитной системы (рис. 4 б, г, рис. 5) характерна следующая конфигурация магнитного поля. На оси магнитной системы существует точка  $O$  (рисунок 5), в которой величина магнитного поля равна нулю. Через точку  $O$  и симметрично расположенные в плоскости катода точки  $A$  и  $B$  можно провести линию которая разделит магнитные потоки выходящие из внешнего полюса магнитной системы. При этом весь магнитный поток, находящийся внутри этой линии, проходит через центральный полюс магнитной системы и равен  $\Phi_{\text{внутр}}$ . Магнитный поток, проходящий снаружи линии  $AOB$ , проходит через наружный полюс магнитной системы и замыкается в виде потоков рассеяния с обратной стороны магнитопровода  $\Phi_{\text{рас}}$ .



*Рисунок 5 – Схема изменения конфигурации магнитного поля в MPC с «несбалансированной» магнитной системой при изменении соотношения числа ампервитков в основной и компенсационной катушке  $K$ . Конфигурация магнитного поля дана для параметра  $K_0$ . Стрелками показано направление смещения точек  $A$ ,  $O$ ,  $B$  при изменении параметра  $K$  [7]*

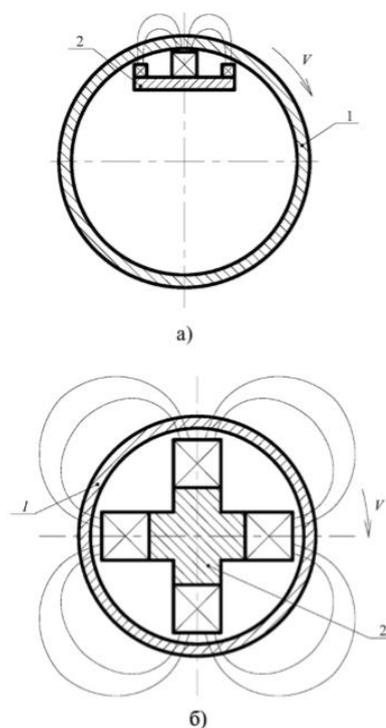
Магнитный поток, проходящий через внешний полюс  $\Phi_{\text{внешн}}$  равен сумме потока через внутренний полюс  $\Phi_{\text{внутр}}$  и потоку рассеяния  $\Phi_{\text{рас}}$ .

$$\Phi_{\text{внешн}} = \Phi_{\text{внутр}} + \Phi_{\text{рас}} \quad (1)$$

Положение точек  $A$ ,  $B$  и  $O$  зависит только от соотношения числа ампервитков в основной  $K_0$  и компенсационной  $K$  катушках или от соотношения намагничивающих сил внешних и внутренних магнитов.

Несбалансированные магнитные системы позволяют производить ионизацию в области вблизи поверхности подложки. Обнаружено, что присутствие ионов в осаждаемом потоке может благоприятно влиять на качество формируемого покрытия [7].

Стремление повысить коэффициент использования материала привело к созданию цилиндрических MPC с подвижной относительно катода магнитной системой. Магнитная система в этих MPC похожа на магнитную систему плоских MPC с протяженным катодом (рисунок 6 а). Разряд горит в форме беговой дорожки, а поверхность катода все время перемещается относительно разряда вслед за магнитной системой.



*Рисунок 6 – МРС с цилиндрическим катодом и перемещаемой относительно катода магнитной системой: а) разряд в виде беговой дорожки, б) разряд в форме «бейсбол», 1 – катод, 2 – магнитная система [7]*

При небольших диаметрах катода магнитная система может иметь крестообразный вид с четырьмя магнитными полюсами [10] (рисунок 6 б). Разряд горит в форме "бейсбол", а магнитная система перемещается относительно катода электроприводом. Разряд перемещается вслед за магнитной системой по поверхности катода. Коэффициент использования материала здесь достигает 90%.

В зависимости от источника питания МРС могут быть на постоянном токе, импульсными, на переменном токе и высокочастотными.

Импульсные магнетронные распылительные системы отличаются от магнетронных распылительных систем постоянного тока применением пульсирующего напряжения питания. Различают униполярное питание, биполярное со смещением и симметричное биполярное питание [11] (рисунок 7). Пульсирующее напряжение питания получают при помощи модулятора, включенного в цепь питания между источником питания и магнетронной распылительной системой.

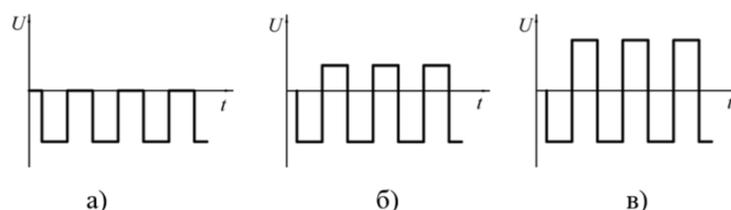


Рисунок 7 – Типы питания импульсных МРС: а) униполярное питание, б) биполярное со смещением (не симметричное), в) симметричное биполярное питание [7]

Применение пульсирующего напряжения позволят снимать избыточный положительный заряд с поверхности диэлектрика на катоде, что предотвращает появление искровых пробоев и убирает причину появления дуговых разрядов.

Различают импульсные магнетронные распылительные системы с одним или двумя распыляемыми электродами (рисунок 8).

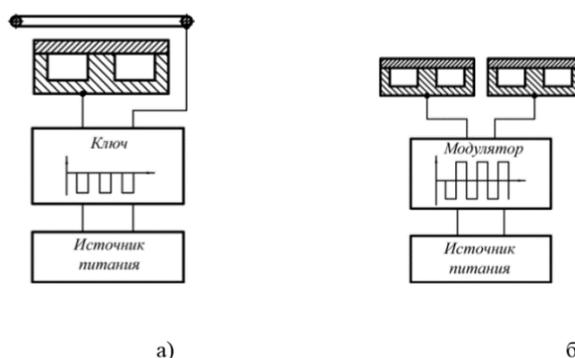


Рисунок 8 – Схемы импульсной МРС: а) система с одним катодом, б) двухкатодная система [7]

Магнетронные распылительные системы с одним катодом питаются униполярным напряжением или биполярным напряжением со смещением. Частота пульсаций лежит в диапазоне 2-60 кГц. При отрицательных импульсах происходит зажигание разряда и его горение, как в магнетронных распылительных системах постоянного тока. Длительность отрицательных импульсов не позволяет развиваться дуговому разряду. Положительные импульсы при не симметричном биполярном напряжении обеспечивают ускоренную разрядку диэлектрических слоев на границах зоны привязки разряда. Это устраняет искровые разряды и дугообразование.

Двухэлектродная (дуальная) импульсная магнетронная система состоит из двух распыляемых электродов и питается симметричным биполярным напряжением. Каждый распыляемый электрод снабжен магнитной системой и попеременно находятся под отрицательным и положительным потенциалом. Таким образом, положение катода и анода меняется. Когда электрод находится под отрицательным потенциалом, распыляется пленка диэлектрика, образовавшаяся в то время, когда электрод являлся анодом. Каждый полупериод, когда электрод работает анодом. Таким образом, снимается проблема «исчезающего» анода. Частота пульсаций лежит в диапазоне 2-60 кГц.

Скорости осаждения покрытий с использованием дуальной МРС при распылении металлической мишени в реактивной газовой среде может составлять единицы нм/с.

Высокочастотные МРС применяются для распыления мишеней из диэлектрических и полупроводниковых материалов. Данные МРС имеют весьма низкие скорости осаждения.

Все выше перечисленные виды МРС объединяет один главный недостаток – низкая скорость осаждения покрытий, которая является неудовлетворительной для осаждения покрытий данным методом в промышленном масштабе. Скорость осаждения металлов для МРС на постоянном токе составляет 1 – 10 нм/с. Скорость осаждения сложного состава еще ниже [12].

### **1.3 Способы повышения скорости осаждения покрытий с использованием МРС**

Скорость осаждения покрытий определяется интенсивностью эмиссии атомов с поверхности мишени [12]. Для увеличения скорости осаждения покрытий нужно увеличить эмиссию атомов.

Для большинства МРС основной механизм эмиссии атомов на поверхности мишени связан с выбиванием атомов из кристаллической решетки

в результате упругих столкновений, т.е. со столкновительным распылением (рисунок 9).

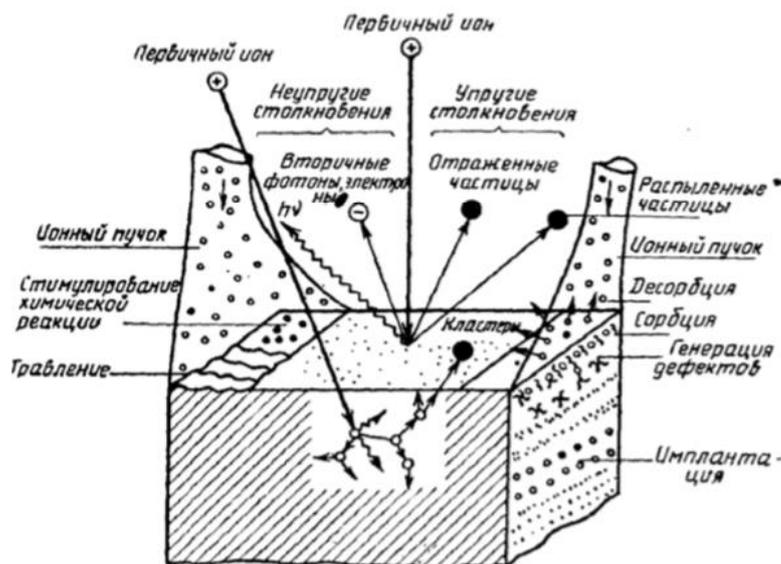


Рисунок 9 – Схема элементарных процессов в твердом теле, инициируемых ионной бомбардировкой [7]

Энергия распыленных атомов лежит, как правило, в диапазоне 1-10 эВ. На выбивание атома, таким образом, тратится энергия, немного превышающая энергию связи, а остальная кинетическая энергия бомбардирующей частицы рассеивается в кристаллической решетке и идет на нагрев тела. Поэтому энергетическая эффективность процессов ионного распыления не очень высока.

Скорость распыления рассчитывается по формуле [12]:

$$V_s = \frac{S \cdot I_{ion}}{e \cdot n_0}, \quad (2)$$

где  $S$  – коэффициент распыления;

$I_{ion}$  – плотность ионного тока;

$e$  – заряд электрона;

$n_0$  – ядерная плотность вещества мишени.

$$I_{ion} = (0,925 \div 0,975) \cdot I_d, \quad (3)$$

где  $I_d$  – плотность тока разряда.

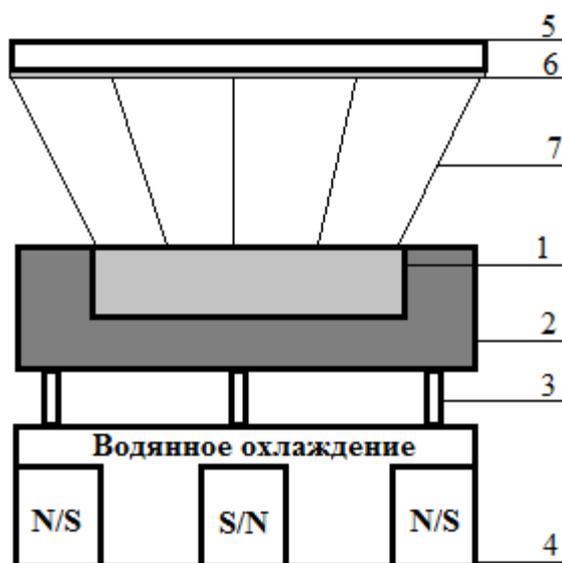
Таким образом, скорость распыления пропорциональна плотности тока ионов. Коэффициент распыления для большинства металлов не превышает нескольких единиц атомов на ион (при энергии бомбардирующих ионов ниже

1000 эВ [11]). Он довольно слабо зависит от температуры облучаемой поверхности [11]. Нарастивать плотность тока магнетронов для того, чтобы сильно повысить скорость эмиссии атомов, не удаётся. Этот способ не является эффективным.

Для повышения эффективности получения эрозионного потока атомов с поверхности мишени МРС можно задействовать другой механизм, который будет дополнять распыление и при этом его интенсивность нелинейно зависит от плотности тока ионов. Это – испарение [3].

Испарение связано с нагревом тела, в следствии которого повышается средняя кинетическая энергия колебаний атома в узле решетки. Для некоторых материалов уже из твердой фазы вещества начинают заметно испаряться атомы. При температуре выше температуры плавления, скорости испарения атомов возрастают, так как их энергия растет, а энергия связи в жидкости ниже, чем в твердом теле.

Магнетроны, которые имеют расплавленную мишень, появились давно. Для распыления из жидкой фазы распыляемый металл помещается в термически изолированный от магнитной системы тигель (рисунок 10). При зажигании разряда, металл катода разогревается и плавится. Металл при этом распыляется со скоростью, которая значительно превышает скорость распыления твердого холодного катода [14, 15]. При повышении плотности тока возрастает температура расплава и давление паров металла над катодом.



*Рисунок 10 – Схематическое изображение осаждения покрытий при работе МРС с теплоизолированной мишенью. 1 – мишень, 2 – тигель, 3 – теплоизолирующие вставки, 4 – блок с охлаждаемыми магнитами, 5 – подложка, 6 – растущая пленка, 7 – поток эмитирующих атомов расплавленной мишени*

При достаточно высокой плотности паров становится возможным горение разряда в парах собственного катода (режим самораспыления) [16]. Такие магнетронные распылительные системы характеризуются наиболее высокими скоростями распыления катода и наибольшими коэффициентами использования материала.

Однако магнетроны с жидкофазными мишенями не получили широкого применения на практике. Имеется много проблем с организацией их устойчивой работы, определением оптимальных рабочих параметров и др. Эти проблемы во многом обусловлены недостаточной изученностью закономерностей тепловых и эрозионных процессов (процессов переноса энергии и вещества) при осаждении покрытий с использованием магнетронных распылительных систем с жидкофазными мишенями.

Другой возможный способ создания испарения – нагрев твердотельных мишеней до температуры, близкой к плавлению, т. е. использование «горячих» твердотельных мишеней. Данный способ применяется путем использования частичной теплоизоляции мишени. Однако пока нет понимания того, какими параметрами должны обладать МРС, чтобы создавать интенсивное испарение на поверхности твердотельной мишени.

Использование МРС с «горячими» мишенями влечет за собой ряд преимуществ в отличие от использования МРС с жидкими мишенями. Самым главным из них является ненужность тигля, что приводит к отсутствию вкраплений его материала в покрытия, отсутствию влияния материала тигля на тепловые характеристики в ходе работы МРС, устранению некоторых нестабильностей, связанных с нахождением расплавленной мишени в

магнитном поле. Однако, данный метод имеет ограничение на материалы мишени. В качестве материалов для «горячих» мишеней используются определенные материалы, которые обладают заметной сублимации уже вблизи температуры плавления (Ti, Cr, Zn и т. некоторые др.). Также данный метод имеет ограничение по сообщаемой мощности мишени ионным током. Мощность ионного тока нужно подбирать так, чтобы мишень не нагревалась до температуры плавления. т. к. полное расплавление мишени в данном методе недопустимо. Здесь возможно лишь расплавление в локальных участках на поверхности мишени.

#### **1.4 Постановка задачи исследований**

Для решения задачи повышения производительности МРС требуется ясное понимание закономерностей всех процессов, происходящих при их работе, ключевым из которых является эмиссия атомов на поверхности мишени. Следовательно, необходимо получить закономерности эволюции тепловых и эрозионных процессов в теплоизолированных и частично теплоизолированных мишенях в зависимости от параметров магнетронных распылительных систем, способных создавать высокоскоростную эмиссию, что и является целью данной работы.

Данные зависимости необходимо получить для случаев жидкометаллических мишеней в тиглях и «горячих» твердотельных мишеней.

Необходимо рассмотреть магнетроны на постоянном токе и импульсные МРС. Для последних проблема повышения скорости осаждения покрытий особенно актуальна, так как за счёт высокой ионизации эмитируемых атомов и их частичного возврата на мишень скорость осаждения покрытий с их использованием оказывается ниже по сравнению с магнетронами на постоянном токе при одинаковой средней мощности [17].

Основные задачи ВКР состоят в следующем:

3. Изучить математические модели и освоить работу с компьютерными программами, описывающими тепловые и эрозионные процессы в жидкофазных и твердотельных мишенях планарных магнетронных распылительных систем.

Компьютерные программы:

- (для жидкофазной мишени в тигле);
- (для твердотельной «горячей» мишени).

4. Выполнить расчёты с использованием этих программ, построить и проанализировать закономерности разогрева и создания эрозионного потока на поверхности теплоизолированных и частично теплоизолированных металлических мишеней магнетронов.

Принять во внимание следующие факторы:

а) агрегатное состояние мишени:

- расплав в тигле,
- твёрдое тело с локальным расплавлением;

б) неравномерное распределение плотности мощности вдоль поверхности мишени;

в) непрерывный и импульсно-периодический режим подачи мощности (напряжения и тока) в электрическую цепь МРС.

3. Выявить закономерности влияния рабочих параметров магнетронов на усиление скорости эрозии поверхности металлических мишеней МРС за счёт создания испарения, исследовать возможности магнетронов, работающих с жидкофазными и горячими твердотельными мишенями, в увеличении производительности осаждения покрытий.

## Глава 2. Описание математических моделей эмиссионных и тепловых процессов в мишени при воздействии плазмы магнетронных распылительных систем разного вида

### 2.1 Механизмы эрозии при высокоскоростном осаждении покрытий

Предположим, что поток эмитируемых атомов складывается из двух независимых компонентов: распылительного и испарительного. Распыление происходит в результате бомбардировки мишени ионами, генерируемыми в области плазмы и ускоряемыми в прикатодном пространстве, а испарение создается её нагревом за счет всех источников тепла, получаемых ею при работе МРС [3].

В таком случае скорость эмиссии атомов с поверхности мишени (скорость эрозии)  $V$ , представляется как сумма  $V = V_s + V_{ev}$ , где  $V_s$ ,  $V_{ev}$  – скорости распыления и испарения соответственно. Аналогично представляется и коэффициент эрозии  $D = D_s + D_{ev}$ , где  $D_s$ ,  $D_{ev}$  – вклады в эмиссию атомов за счет распыления и испарения соответственно [3].

Скорость распыления пропорциональна плотности ионного тока  $I_{ion}$  и коэффициенту распыления  $S$  [3]:

$$V_s = \frac{S \cdot I_{ion}}{e \cdot n_0}, \quad (4)$$

где  $e$  – заряд электрона,

$n_0$  – ядерная плотность вещества мишени.

$$I_{ion} = (0,925 \div 0,975) \cdot I_d, \quad (5)$$

где  $I_d$  – плотность тока разряда.

Коэффициент распыления может быть рассчитан по формуле, выведенной П. Зигмундом для режима первичного выбивания [17]:

$$S \approx \frac{3}{4\pi^2} \alpha \left( \frac{\gamma E_0}{U_s} \right); E_0 \gg U_s, \quad (6)$$

где  $\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2}$ ,

$M_1, M_2$  – массы атомов налетающего и принимающего удар соответственно;

$\alpha$  – параметр, зависящий от соотношения  $\frac{M_2}{M_1}$ ;

$U_s$  – поверхностная энергия связи атомов в мишени.

Тогда скорость распыления рассчитывается по следующему выражению [17]:

$$V_s = \frac{3\alpha M_1 M_2 W_{ion}}{\pi^2 (M_1 + M_2)^2 n_0 U_s}, \quad (7)$$

где  $W_{ion}$  – плотность мощности ионного тока, направленного на мишень.

$$W_{ion} \approx 0,6U_d * 0,95I_d = 0,57P_d, \quad (8)$$

где  $P_d$  – плотность мощности разряда.

Скорость испарения в условиях вакуума рассчитывается с помощью уравнения Герца-Кнудсена [12]:

$$V_{ev}(T) = \frac{1}{n_0(2\pi mkT)^{\frac{1}{2}}} (p_{sat}(T) - P^*), \quad (9)$$

где  $m$  – масса испаряющегося атома (молекулы),

$k$  – постоянная Больцмана;

$p_{sat}(T)$  – давление насыщенного пара при температуре поверхности  $T$ ;

$P^*$  – гидростатическое давление над поверхностью испарения.

Функция  $p_{sat}(T)$  имеет вид, приближенно описываемый экспонентой [3].

Величина  $P^*$  складывается из давления испарившегося вещества, находящегося над поверхностью ( $P$ ), и давления рабочего газа в камере ( $P_{res}$ ) [3].

Как правило, значения  $P_{res}$  при работе МРС составляет десятые доли Па, что на порядки меньше давления насыщенных паров металлов при температуре плавления. Поэтому при расчете скорости испарения можно считать, что  $P_{res}=0$  [3].

Таким образом, для определения скорости испарения на поверхности мишени МРС необходимо вычислить ее температуру. Температура рассчитывается при решении краевой задачи, сформулированной на основе

уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрической системе координат с азимутальной симметрией.

## 2.2 Математическая модель тепловых и эрозионных процессов при работе МРС на постоянном токе с теплоизолированной мишенью

Так как в системе «мишень – окружающая среда» устанавливается стационарный температурный режим [3], то баланс энергии в системе «мишень в тигле» для стадии установившейся работы МРС можно привести в следующем виде [16]:

$$W_{ion}(P_d) = Q_{ref}(U_d, I_d) + Q_R(T) + Q_{ev}(T) + Q_s(P_d), \quad (10)$$

где  $Q_{ref}$  – мощность потока отраженных ионов,

$Q_R$  – мощность теплового излучения от всей внешней поверхности мишени и тигля,

$Q_{ev}, Q_s$  – мощность, уносимая с поверхности мишени испарившимися и распыленными атомами соответственно.

Величина  $Q_{ref}$  определяется следующим образом:

$$Q_{ref} = (1 - R_E)P_{ion}, \quad (11)$$

где  $P_{ion}$  – мощность ионного тока, падающего на поверхность,

$R_E$  – коэффициент отражения энергии иона.

$$R_E = \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} EN(E)dE, \quad (12)$$

где  $E_0$  – энергия падающих ионов,

$N(E)$  – энергетический спектр отраженных ионов.

В пределе  $E_0 \gg E_S$ , где  $E_S$  – энергия тепловых колебаний атомов на поверхности, коэффициент аккомодации  $\alpha_{ак} = \frac{E_0 - E_{ref}}{E_0 - E_S}$  (здесь  $E_{ref}$  – энергия отраженных частиц) связан с  $R_E$  соотношением [3]:

$$\alpha_{ак} = 1 - R_E \quad (13)$$

Величина  $Q_R(T)$  определяется следующим образом:

$$Q_R(T) = Q_{R_{тигля}} + Q_{R_{мишени}} = \sigma T^4 (\varepsilon_{тигля} * S_{тигля} + \varepsilon_{мишени} * S_{мишени}) \quad (14)$$

Величина  $Q_{ev} = v(T)q(T)$ , где  $v(T)$  и  $q(T)$  – массовая скорость и удельная теплота испарения.

Оценка плотности мощности, уносимой распылёнными частицами, может быть выполнена через наиболее вероятную энергию распылённых атомов  $E_p$  [16].

$$E_p \approx \frac{U_s}{2} \quad (15)$$

Решение нелинейного уравнения (7) дает значение температуры мишени в установившемся режиме работы МРС при заданной средней плотности мощности разряда  $P_d$ . Отсюда же находится соответствующая ей скорость испарения  $V_{ev}$  [16].

### 2.3 Нестационарная математическая модель для МРС с жидкофазной мишенью

Скорость испарения рассчитывается путем решения тепловой задачи следующего вида [12]:

$$\frac{\partial E(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - V \frac{\partial E(\mathbf{r}, t)}{\partial z} = \text{div } \lambda \nabla T(\mathbf{r}, t), \quad (16)$$

где  $E(\mathbf{r}, t)$  и  $T(\mathbf{r}, t)$  соответственно функции тепловой составляющей внутренней энергии и температуры мишени;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Ось  $Oz$  направлена перпендикулярно облучаемой поверхности, вдоль направления падения пучка ионов.

Начальные условия:  $T(\mathbf{r}, 0) = T_0$ .

Скорость испарения  $V_{ev}$  находится из уравнения Герца – Кнудсена [12]:

$$V_{ev}(T) = \frac{1}{n_0(2\pi M_2 k_B T)^{\frac{1}{2}}} (P_{sat}(T) - P^*), \quad (17)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана;

$P_{sat}$  – давление паров вещества мишени при температуре  $T$ ;

$P^*$  – гидростатическое давление на поверхность испарения.

Граничные условия на облучаемой поверхности ( $z = 0$ ) [12]:

$$\lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial z} = -q + \rho V_{ev} \Delta H + Q_{rad} + Q_s, \quad (18)$$

где  $q$  – плотность мощности плазмы, действующей на поверхность мишени, которая в первом приближении равна плотности мощности тока ионов  $P_{ion}$  с поправкой на энергию отраженных частиц [3,17]. Изменение плотности мощности ионного тока во времени определяется осциллограммой мощности источника питания магнетрона [12].

В уравнении (18) второй член правой части описывает расход энергии на испарение ( $\Delta H$  – разность энтальпий паровой и конденсированной фаз,  $\rho$  – плотность вещества мишени,  $\rho V_{ev} \Delta H = Q_{ev}$ ). Здесь также присутствуют стоки энергии за счет теплового излучения  $Q_{rad}$  и распыления  $Q_s$  [12].

На задней поверхности мишени задавались граничные условия двух видов. Одно из них соответствовало ее охлаждению, что, как правило имеет место при работе большинства видов МРС. Второе фиксировало отсутствие стока тепла за счет теплопроводности, свойственное МРС с теплоизолированной мишенью [12].

## 2.4 Математическая модель нестационарных тепловых и эмиссионных процессов в мишени с разными способами теплоотвода

Задача с учетом фазовых переходов первого рода имеет следующий вид [18]:

$$\frac{\partial E(z,r,t)}{\partial t} - V(t) \frac{\partial E(z,r,t)}{\partial z} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T(z,r,t)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T(z,r,t)}{\partial r^2} \right) \quad (19)$$

Граничное условие на облучаемой поверхности ( $z = 0$ ) [18]:

$$\lambda \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z} = -q(r,t) + \rho V_{ev}(r,t) \Delta H + Q_{rad}(r,t) + Q_s(r,t) \quad (20)$$

Начальные условия:  $T(z,r) = T_0(z,r)$ .

$E(z,r,t)$  и  $T(z,r,t)$  – соответственно функции тепловой составляющей внутренней энергии и температуры в системе «мишень в тигле»;  $\lambda(z,r)$  – коэффициент теплопроводности мишени [18].

Ось  $OZ$  направлена перпендикулярно облучаемой поверхности, вдоль направления падения потока ионов; ось  $Or$  – вдоль поверхности. Схематическое изображение пространственной области задачи приведено на рисунке 11.

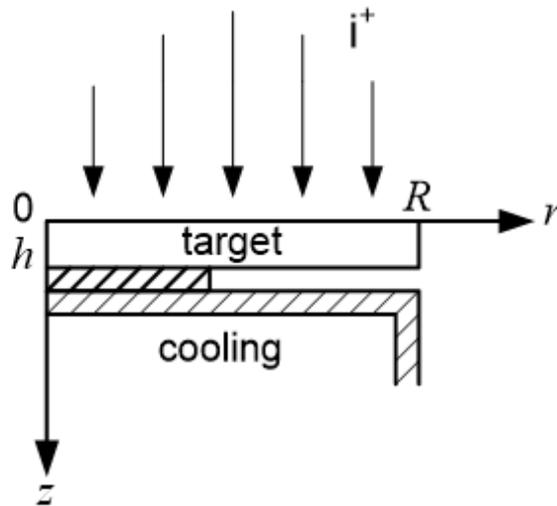


Рисунок 11– Пространственная область для расчета температуры в мишени магнетрона [18]

Связь между температурой  $T$  и тепловой составляющей внутренней энергии  $E$  в самом простом приближении может быть представлена следующим образом [16]:

$$T = E/c\rho \text{ при } E \leq E_m \quad (21)$$

$$T = T_m \text{ при } E_m < E < E_m + q_m\rho \quad (22)$$

$$T = T_m + \frac{E - (E_m + q_m\rho)}{c\rho} \text{ при } E > E_m + q_m\rho, \quad (23)$$

где  $c, \rho$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность вещества мишени;

$T_m$  и  $q_m$  – температура и удельная теплота плавления;

$$E_m = T_m c\rho.$$

Данная запись уравнения (20) позволяет учесть затраты энергии на плавление, если они возникают на каком-либо локальном участке поверхности мишени.

В (20)  $q(r, t)$  – плотность мощности плазмы, действующей на поверхность мишени. Распределение  $q$  вдоль поверхности мишени

соответствует пространственному профилю горизонтальной составляющей магнитного поля [18].

В уравнении (20)  $\Delta H$  – разность энтальпий паровой и конденсированной фаз вещества мишени,  $\rho$  – плотность вещества мишени. Сюда также добавлен сток тепла за счет излучения  $Q_{rad}(r, t)$ . Расход энергии на распыление учтен через слагаемое  $Q_s$  – плотность мощности, которую уносят распыленные частицы. Эту величину можно оценить как  $Q_s = E_p V_{sput} n_0$ , где  $E_p$  – наиболее вероятная энергия в спектре распыленных частиц, которая согласно формуле Томсона для спектра распыленных атомов в режиме линейных каскадов примерно равна  $0,5U_s$ ,  $U_s$  – поверхностная энергия связи атомов мишени,  $n_0$  – ее ядерная плотность [18].

На боковых поверхностях мишени тепло отдается окружающей среде за счет теплового излучения.

На задней поверхности, контактирующей с охлаждаемым блоком катодного узла, существует два вида теплообмена с окружающей средой. Там, где нет непосредственного контакта задней поверхности мишени с охлаждающей пластиной, задается сток тепла за счет излучения [18].

В области контакта мишени с охлаждаемой пластиной принимается условие непрерывности потока за счет теплопроводности [18]:

$$\lambda \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z} = \lambda_{plate} \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z}, \quad (24)$$

где  $\lambda_{plate}$  – коэффициент теплопроводности контактной пластины.

Примем для удобства случай идеального теплового контакта, тогда граничное условие примет вид [18]:

$$\lambda_{plate} \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z} = \lambda_{cool} \frac{T_{cool} - T_{surf,w}}{\Delta z}, \quad (25)$$

где  $\lambda_{cool}$  – коэффициент теплопроводности охладителя;

$\Delta z$  – расстояние вблизи стенки контактной пластины, на которой происходит теплообмен с охладителем за счет теплопроводности;

$T_{surf,w}$  – температура охлаждаемой стенки контактной пластины;

$T_{cool}$  – температура охладителя.

Решение этой задачи позволяет рассчитать скорость удаления атомов с любого элемента на поверхности мишени, или скорость эрозии ее поверхности  $V$ , в любой момент времени при использовании постоянных и импульсно-периодических источников питания МРС [18].

## **2.5 Обоснование корректности моделей**

Для обоснования корректности модели нестационарных тепловых и эмиссионных процессов в мишени с разными способами теплоотвода были проведены эксперименты, описанные в [12, 18].

В работе [3] приведено обоснование корректности стационарной модели тепловых и эрозионных процессов на основании сопоставления результатов расчетов и экспериментов.

Для обоснования корректности нестационарной модели тепловых и эрозионных процессов была приведена зависимость скорости роста толщины покрытий от плотности мощности ионного тока при использовании металлических мишеней, помещенных в молибденовый дисковый тигель (рисунок 12). Здесь сплошные линии – рассчитанные значения суммарной скорости осаждения, пунктирные и штриховая – только за счет распылительного компонента. Точки – данные эксперимента, проведенные в работе [17]. Хорошее совпадение расчетов и экспериментальных данных говорит о корректности данного модельного представления механизмов эмиссии атомов с поверхности металлических мишеней МРС при плавлении и испарении [12].

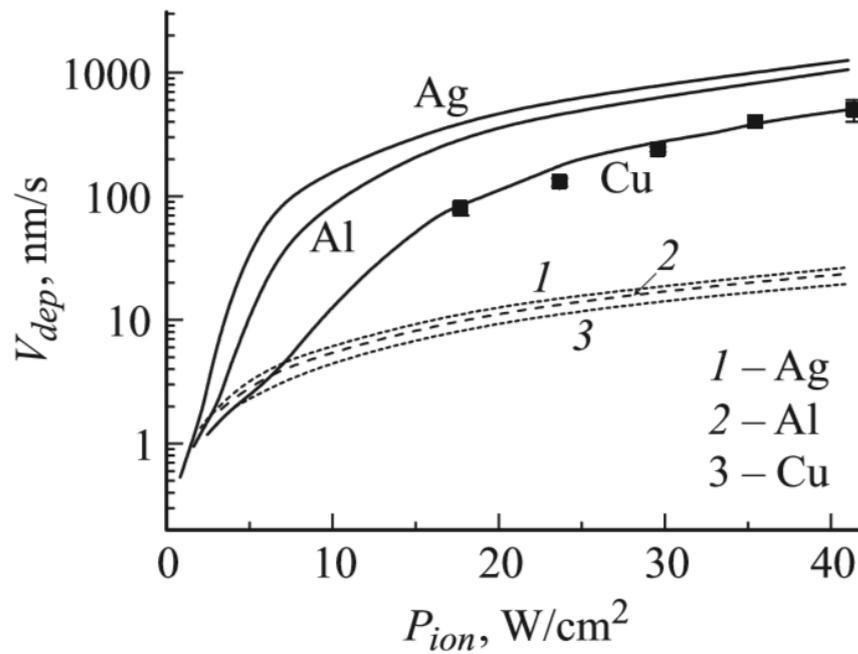
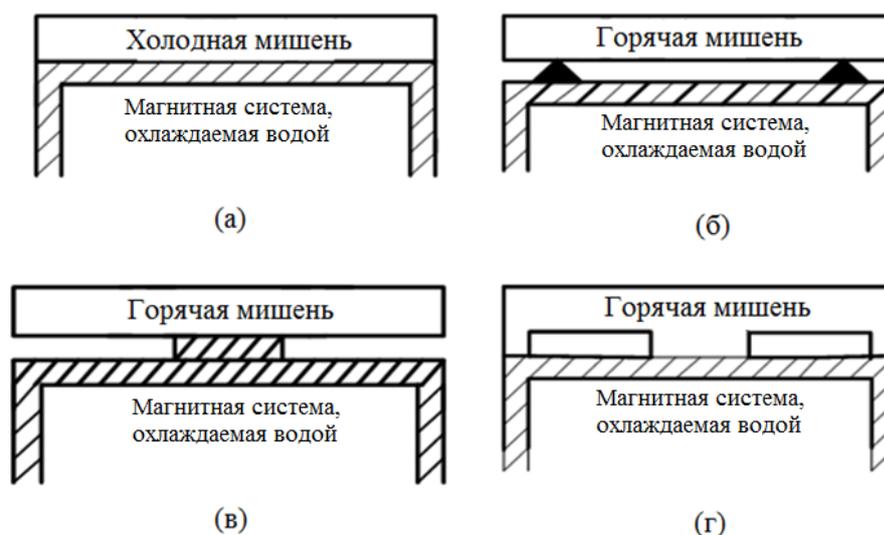


Рисунок 12 – Зависимость скорости роста толщины покрытий от плотности мощности ионного тока при использовании металлических мишеней, помещенных в молибденовый дисковый тигель; диаметр мишени 88 мм; рабочий газ – аргон [12]

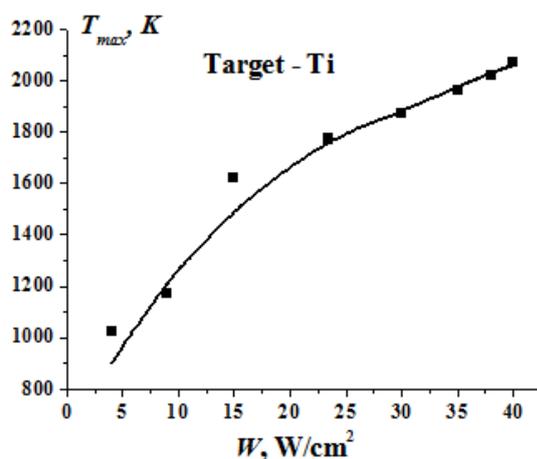
В работе [19] эксперименты выполнялись с полностью охлаждаемой и частично охлаждаемой (горячей) мишенью. Теплоизоляция горячей мишени производилась по схеме, изображенной на рисунке 13 (г).



*Рисунок 13 – Схематическое изображение разных способов организации теплопроводного контакта мишеней МРС с охлаждаемыми элементами катодного узла: (а) – полное охлаждение, (б) – полная теплоизоляция, (в) и (г) – частичная теплопроводная изоляция*

Расчеты для экспериментов выполнялись для планарных магнетронов, работающих на постоянном токе и в импульсно-периодическом режиме подачи мощности с частотой следования импульсов не ниже 100 Гц. Средняя мощность в импульсе составляла от  $10^2$  до  $10^4$  Вт, что соответствует плотности мощности, передаваемой мишени, от 10 до  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. Рабочий газ – аргон. Давление в рабочей камере - ниже 0,5 Па.

Характер развития тепловых процессов в мишени, полученный расчётным путём, подтверждается экспериментальными данными, опубликованными в статье [19]. На рисунке 14 показана зависимость максимальной температуры в установившемся режиме от усреднённой плотности мощности МРС.



*Рисунок 14 – Зависимость максимальной температуры на поверхности титановой мишени с частичным охлаждением от усредненной плотности мощности разряда СИМРС (радиус мишени – 5 см, высота – 0,6 см, охлаждение – через медную пластину радиусом 5 мм в центре мишени) [18]*

Здесь сплошная линия – результат расчета, точки – результаты измерений авторов статьи [19]. В экспериментах и расчётах исследуется титановая мишень радиусом 50 мм. Её охлаждение организовано по схеме «с» на рисунке 10 (радиус распорного кольца – 5 мм, охлаждающая пластина изготовлена из меди). Хорошее совпадение результатов расчёта и экспериментов даёт основание полагать, что модельные представления о развитии тепловых процессов в мишени импульсного магнетрона являются корректными.

## Глава 6. Экономическая часть

### 6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения

#### 6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегмент рынка – особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными признаками.

Сегментирование – разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Таблица 5. Карта сегментирования рынка некоторых методов нанесения тонкопленочных покрытий

		Виды покрытий и требования к ним							
		Металлические	Диэлектрические	Многослойные	На подложки большой площади	Отсутствие загрязнения (искл. раб. га.)	Высокая равномерность	Высокая скорость осаждения	Отсутствие сильного нагрева подложек
Методы нанесения	МРС								
	Диодное распыление								
	Термическое испарение								

Актив. лазеро м или э. п. хим. газ.- фаз. осажде ние								
Фотохи м. газ.- фаз. осажде ние								

По итогам карты сопоставления сегментирования рынка методов нанесения тонкопленочных покрытий видно, что магнетронные распылительные системы являются одним из популярных методов нанесения покрытий. Данный метод позволяет получить покрытия разного состава и хорошего качества. При этом не оказывается существенного термического или радиационного влияния на подложку, что позволяет использовать данный метод для подложек практически любого вида. Этим объясняется широкая распространенность данного метода.

### 6.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Для проведения анализа конкурентоспособности используется оценочная карта, приведенная в таблице 2. В качестве конкурирующих разработок были приняты К1 – модель, опубликованная в источнике [20], К2 – математическая модель сильноточного импульсного магнетронного разряда с автоускорением плазмы, опубликованная в [21]. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i * B_i, \quad (33)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

В таблице 6 представлена оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Таблица 6. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
Повышение производительности труда пользователя	0,3	5	3	4	1,5	0,9	1,2
Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,3	5	3	3	1,5	0,9	0,9
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
Конкурентоспособность продукта	0,3	3	2	3	0,9	0,6	0,9
Уровень проникновения на рынок	0,1	3	2	3	0,3	0,2	0,3
Итого	1				4,2	2,6	3,2

Из данного анализа видно, что программный комплекс на основе математических моделей, описанных в п. 2.3 и 2.4 имеет такие преимущества над конкурентами, как повышение производительности труда и функциональная мощность. Это связано с тем, что данный программный комплекс позволяет получить больше интересующей с практической точки зрения информации и подобрать нужные режимы осаждения покрытий для разных видов МРС. Работы конкурентов нацелены на более узкие проблемы.

### 6.1.3 Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADviser) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющее принимать решение

целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1. Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:
  - влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
  - перспективность рынка;
  - пригодность для продажи;
  - перспективы конструирования и производства;
  - финансовая эффективность;
  - правовая защищенность и др.
2. Показатели оценки качества разработки:
  - динамический диапазон;
  - вес;
  - ремонтпригодность;
  - энергоэффективность;
  - долговечность;
  - эргономичность;
  - унифицированность;
  - уровень материалоемкости разработки и др.

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

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

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{\text{cp}} = \sum B_i * B_i, \quad (34)$$

где  $P_{\text{cp}}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

$B_i$  – вес показателя (в долях единиц);

$B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

Таблица 7. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений по технологии QuaD

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Показатели оценки качества разработки					
Функциональная мощность	0,25	100	100	1	0,25
Простота эксплуатации	0,19	80	100	0,8	0,152
Качество интеллектуального интерфейса	0,11	80	100	0,8	0,088
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
Конкурентоспособность продукта	0,2	90	100	0,9	0,18
Перспективность рынка	0,15	100	100	1	0,15
Финансовая эффективность научной разработки	0,1	90	100	0,9	0,09
Итого	1				91

$P_{cp} = 91$  – величина средневзвешенного значения показателя качества и перспективности научной разработки, оцененного по формуле. Исходя из величины данного показателя можно сказать, что комплекс программ, используемый для исследования в данной работе является перспективной разработкой.

#### 6.1.4 SWOT-анализ

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

В таблице 8 представлен первый этап SWOT-анализа – описание сильных и слабых сторон исследования.

Таблица 8. Описание сильных и слабых сторон исследования

<p><b>Сильные стороны:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Технические преимущества перед конкурентами в виде программного комплекса, позволяющего быстро смоделировать нужную ситуацию.</li> <li>2. Исследования направлены на МРС разных видов.</li> <li>3. Исследования ведутся в приоритетной отрасли в мире – нанесение тонкопленочных покрытий.</li> <li>4. Получены результаты, описывающие общие закономерности.</li> <li>5. Проект близок к завершению.</li> </ol>	<p><b>Слабые стороны:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оптимизация программного комплекса.</li> <li>2. Исследования проведены для малого количества случаев.</li> </ol>
<p><b>Возможности:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оптимизировать программный комплекс для последующей продажи.</li> <li>2. Создать библиотеку с уже полученными результатами исследования.</li> </ol>	<p><b>Угрозы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Растущая конкуренция.</li> <li>2. Проблемы с финансированием проекта.</li> <li>3. Потеря интереса в мире к таким видам МРС, как СИМРС и жидкофазная МРС.</li> </ol>

Таблица 9. Сопоставление сильных сторон и возможностей исследования

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	0	+	0	+
	B2	+	+	+	+	+

Из данной таблицы видно, что самое благоприятное направление реализации проекта – это B1B2C1C3C5.

Таблица 10. Сопоставление слабых сторон и возможностей исследования

Слабые стороны проекта			
Возможности		Сл1	Сл2
	V1	+	-
	V2	+	+

Из данной таблицы видно, что направление реализации проекта – это V1V2Сл1; V2Сл2.

Таблица 11. Сопоставление сильных сторон и угроз исследования

Сильные стороны проекта и угрозы						
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	0	+	-	-	-
	У2	-	-	0	0	-
	У3	-	-	0	-	-

Из данной таблицы видно, что направление реализации проекта – это У1С2.

Таблица 12. Сопоставление слабых сторон и угроз исследования

Слабые стороны и угрозы			
Угрозы		Сл1	Сл2
	У1	+	+
	У2	+	-
	У3	-	-

Из данной таблицы видно, что направление реализации проекта – это У1У2Сл1; У1Сл2.

Таблица 13. Матрица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны:</b>	<b>Слабые стороны:</b>
	<p>1. Технические преимущества перед конкурентами в виде программного комплекса, позволяющего быстро смоделировать нужную ситуацию.</p>	<p>1. Оптимизация программного комплекса. 2. Исследования проведены для малого количества случаев.</p>

	<p>2. Исследования направлены на МРС разных видов.</p> <p>3. Исследования ведутся в приоритетной отрасли в мире – нанесение тонкопленочных покрытий.</p> <p>4. Получены результаты, описывающие общие закономерности.</p> <p>5. Проект близок к завершению.</p>	
<p><b>Возможности:</b></p> <p>1. Оптимизировать программный комплекс для последующей продажи.</p> <p>2. Создать библиотеку с уже полученными результатами исследования.</p>	<p>Оптимизация программного комплекса в дальнейшем позволит создать обширную библиотеку данных и, затем, данный программный комплекс продавать вместе с библиотекой данных. Данный проект ведется в приоритетной отрасли индустрии, что может обеспечить высокий спрос. Т.к. проект близок к завершению, то большой конкуренции в ближайшее время на рынке не будет.</p>	<p>Оптимизация программного комплекса и создание библиотеки данных позволит устранить недостатки, которыми обладает программный комплекс.</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>1. Растущая конкуренция.</p> <p>2. Проблемы с финансированием проекта.</p> <p>3. Потеря интереса в мире к таким видам МРС,</p>	<p>Так как область исследований является приоритетной, то возможен риск растущей со временем конкуренции. То, что исследования направлены на МРС разных видов</p>	<p>Пока программный комплекс не оптимизирован остается угрозой конкуренции и проблемы с финансированием.</p>

как СИМРС и жидкофазная МРС.	добавляет сложность в работе, что повлечет за собой больше финансовых и временных затрат, и проблемы финансирования.	
------------------------------	--	--

## 6.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Таблица 14. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме, проведение патентных исследований.	Научный руководитель, студент
	3	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	4	Календарное планирования работ по теме	Научный руководитель, студент
Теоретические исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Научный руководитель
	6	Построение моделей	Научный руководитель

	7	Проведение расчетов по разработанным моделям	Студент
	8	Анализ полученных результатов	Студент
Проведение ОКР			
Разработка технической документации и проектирование Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	9	Оценка эффективности производства и применения	Студент
	10	Составление описания работы компьютерных программ, основанных на разработанных моделях	Студент
	11	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент

### 6.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Для определения среднего значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (35)$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (36)$$

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

$t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

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

### 6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}}, \quad (37)$$

Где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -той работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность работы в рабочих днях;

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T - T_{\text{пр}}}, \quad (38)$$

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

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

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

Таблица 15. Временные показатели проведения научного исследования

Название работ	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	tmin, чел.-дн.		tmax, чел.-дн.		toжi, чел.-дн.		Руководитель	Студент	Руководитель	Студент
	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент				
Составление и утверждение технического задания	1		4		2,2		2,2		3	
Подбор и изучение материалов по теме		20		40		28		28		35
Выбор направления исследования	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1
Календарное планирование по теме	2	3	2	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
Проведение теоретических расчетов и обоснований	10		20		14		14		18	
Построение моделей	30		40		34		34		42	
Проведение расчетов по разработанным моделям		26		46		34		34		42

Анализ полученных результатов		26		46		34		34		42
Оценка эффективности производства и применения		2		5		3,2		3,2		4
Составление описания работы компьютерных программ, основанных на разработанных моделях		2		5		3,2		3,2		4
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)		25		30		27		27		33

Таблица 16. Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исполнители	Тк i, ка л. дн	Продолжительность выполнения работ																										
				сентяб.		окт.			нояб.			декаб.		январ.		февр.			март			апр.			май			июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2





### 6.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании 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:

1. материальные затраты НТИ;
2. затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
3. основная заработная плата исполнителей темы;
4. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
5. накладные расходы.

#### 6.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) * \sum_{i=1}^m C_i * N_{расхи}, \quad (39)$$

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, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

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

Материальные затраты, необходимые для данного проекта, занесены в таблицу 18.

Основные работы для ВКР проводились за рабочей станцией (персональный компьютер). Время, проведенное за рабочей станцией: 1808 часов. Мощность рабочей станции: 0,5 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эп}} * P * F_{\text{об}} = 2,05 * 0,5 * 1808 = 1853,2 \text{ руб.},$$

где  $C_{\text{эп}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (2,05 руб. за 1 кВт\*ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

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

Затраты на электроэнергию составили 1853,2 руб.

В таблице 17 представлен расчет бюджета на приобретение спецоборудования для научных работ.

Таблица 17. Расчет бюджета на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование		Кол-во		Цена единицы оборудования, тыс.руб		Общая стоимость оборудования, тыс.руб.	
Руководитель	Студент	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент
Персональный компьютер	Персональный компьютер	1	1	15,2	15,2	15,2	15,2
Итого, руб:		30400 руб.					

Таблица 18. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена, за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Электричество	кВт*ч	1808	2,05	1853,2
Бумага	шт	400	1	400
Печать на листе А4	шт	256	2	512
Карандаш	шт	4	20	80

Ластик	шт	2	20	40
Доступ в Интернет	месяц	5	350	1750
Учебная литература	шт	1	500	500
Итого, руб	5135,2			

### 6.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} * T_p, \quad (40)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m * M}{F_d}, \quad (41)$$

Где  $Z_m$  – месячный должностной работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года, при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6 – дневная рабочая неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн (таб. 19).

Таблица 19. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные дни, праздничные дни)	66	66
Потери рабочего времени (отпуск, невыходы по болезни)	48	62
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	237

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} * k_p, \quad (42)$$

Где  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 20.

Таблица 20. Расчет основной заработной платы

Исполнители	Разряд	$k_t$	$Z_{тс}$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн.}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн.}$ , руб.
Руководитель			33162,87	1,3	43111,731	1786,03	66	117877,98
Студент			6976,22		6976,22	306,13	163	49899,19
Итого $Z_{осн.}$ :								167777,17

Основная заработная плата руководителя от ТПУ рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- 1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями;
- 2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.;
- 3) иные выплаты, районный коэффициент.

### 6.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} * (З_{осн} + З_{доп}), \quad (43)$$

где  $k_{внеб}$  – 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 вводится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 21.

Таблица 21. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата
Руководитель	117877,98
Студент - дипломник	49899,19
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271
Итого:	31944,93
Руководитель	31944,93
Студент-дипломник	0

### 6.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и

телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) * k_{\text{нр}}, \quad (44)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

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

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} * Z_{\text{осн}}, \quad (45)$$

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

Накладные расходы составляют  $Z_{\text{накл}} = 35363,39$  руб.

### 6.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 22.

Таблица 22. Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб
Материальные затраты НИИ	5135,2
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	30400
Затраты по основной заработной плате	167777,17
Отчисления во внебюджетные фонды	31944,93
Накладные расходы	35363,39
Бюджет затрат НИИ	270620,69

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

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (46)$$

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

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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

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

$$I_{pi} = \sum a_i b_i, \quad (47)$$

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

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы 23.

Таблица 23. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой коэффициент	Исполнение
Критерии	параметра	1
Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	5
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,25	5
Энергосбережение	0,3	3
Материалоемкость	0,25	4
Итого	1	

$$I_{p-исп1} = 0,2 * 5 + 0,25 * 5 + 0,3 * 3 + 0,25 * 4 = 4,15$$

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}} \quad (48)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (49)$$

Таблица 24. Эффективность разработки

№	Показатели	Исп. 1
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,15
3	Интегральный показатель эффективности	0,25

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Но т.к. задача имеет довольно строгие условия, то на настоящий момент существует лишь один вариант исполнения.

## **Список публикаций**

1. Комарова Д. А., Егорова М. С. Теоретические основы расчета издержек и себестоимости продукции предприятия // Молодой ученый. – 2015. – №11.4. – с. 146 – 149.
2. Комарова Д. А., Егорова М. С. Источники формирования и развития капитала, трудовые ресурсы, технология производства продукции предприятия ОАО «Кемеровская генерация» // Молодой ученый. – 2015. – №11.4. – с. 143-146.
3. Комарова Д. А., Егорова М. С. Анализ производственного потенциала предприятия на примере ОАО «Кемеровская генерация» // Молодой ученый. – 2015. – №11.4. – с. 141-143.
4. Комарова Д. А., Бадараев А. Д., Баженов А. Ю., Егорова М. С. Экономические преимущества инновационных методов магнетронного распыления // Молодой ученый. – 2015. – №10. – с. 228-231.